

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개(), 발간등록번호()

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종 보고서

발 간 등 록 번 호

11-B552989-000215-01

터널 공기력 저감을 위한 하이퍼루프형
압축기 적용 고속열차 공력설계기술 연구

최종보고서

2019. 12.

주관연구기관 / 한국교통대학교

공동연구기관 / (주)넥스트폼

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

터널 공기력 저감을 위한 하이퍼루프형 압축기 적용 고속열차 공력설계기술 연구

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

R&D Report
Land, Infrastructure and Transport

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘터널 공기력 저감을 위한 하이퍼루프형 압축기 적용 고속열차 공력설계기술 연구’(연구개발
기간 : 2018. 04. ~ 2019. 12.) 과제의 최종보고서 12부를 제출합니다.

2019. 12. 31.

주관연구기관명 : 한국교통대학교 산학협력단장 전 문 수 (인)

공동연구기관명 : (주)넥스트폼 대표이사 김 병 윤 (인)

주관연구기관책임자: 권 혁 빈

공동연구기관책임자: 신 재 렬

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	공고-제37호	해당 단계 연구 기간	2019. 01. 01 - 2019. 12. 31	단계구분	1/1
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	터널 공기력 저감을 위한 하이퍼루프형 압축기 적용 고속열차 공력설계기술 연구			
연구책임자	권혁빈	해당단계 참여연구원 수	총: 7명 내부: 7명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:220,000천원 민간: 73,333천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:493,333천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 7명 내부: 7명 외부: 명	총 연구비	정부:370,000천원 민간:123,333천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:493,333천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주관) 한국교통대학교 산학협력단 (공동) (주)넥스트폼 기술연구소			참여기업명 (주)넥스트폼	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반
-------------------------	----

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	Y	Y	Y	N	N	Y	N	N	N	N	N

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)	보고서 면수: 174
---	-------------

요약문

연구의 목적 및 내용	본 연구는 기존 고속선의 터널 단면적을 유지하면서 운행속도를 400km/h로 증속할 경우 발생하는 공기저항, 승객 이명감 및 미기압파 등 터널 공기력 문제를 해결하기 위해 하이퍼루프와 같이 압축기를 차량에 적용하여 공기력을 효율적으로 저감하는 기술의 개발을 목표로 하며, 이를 위해 고속열차에 적용가능한 압축기를 탐색하고 다양한 설계 아이디어를 도출한 후 설계개념 후보를 도출하였다. 또한, 고속열차 전용 CFD 해석 프로그램을 개발하여 터널-열차 모형에 대해 강건하고 정확한 유동해석을 수행하는 동시에 압축기 적용 시의 공기력 저감 효과를 검토할 수 있는 수치해석 도구를 마련하였으며, 고속열차에 대한 다양한 해석을 용이하게 수행할 수 있는 사용자 환경을 구성하였다. 마지막으로 개발된 프로그램 등을 활용하여 흡,배기구 면적, 열차 속도, 터널 길이 등의 파라메타를 바꾸어가며 압축기 적용 고속열차의 터널 공기력 저감 효과를 평가하여 최종설계(안)을 도출하고 3차원 모델에 대한 검증을 수행하였다.				
연구개발성과	고속열차 운용조건을 고려하여 철도차량 내부에 탑재 가능한 최대직경 0.4m, 최대길이 0.3m 정도인 다단 축류압축기인 ‘항공기 엔진용 3단 천음속 축류압축기’를 고속열차 적용에 가장 적합한 압축기로 선정하였으며, 설계개념 아이디어의 분석 및 형태소분석기법(Morphological analysis)을 이용하여 총 72개의 설계개념 후보를 도출하였고, 최종적으로 열차 단수 압축기형, 선두차 단수 압축기형 및 압축기 외부장착형 등 총 3개의 최종 설계개념 후보를 도출하였다. 압축기 유입구 및 토출구에서의 유동 조건을 계산할 수 있는 압축기 성능곡선 및 모듈과 격자 정보 없이 질점만으로 구성된 해석 질점계 상에서 해석을 수행할 수 있는 무격자 기반 유동해석 기법을 개발 및 검증하였다. 개발 프로그램은 고속열차 해석 과정에서 생성되는 형상곡선, 해석용 질점계, 유동 해석 결과를 GUI 상에서 확인할 수 있으며, 검증을 위해 KTX 열차의 복안터널 통과 문제를 해석한 결과 승객 이명감 1.6%, 미기압파 4.0% 등 모든 검증 항목에서 기존 프로그램(C-STA) 대비 96% 이상의 정확도를 나타냄을 확인하였다. 개발 프로그램 등으로 3종의 압축기 적용 고속열차 설계개념 후보를 비교하여 평가한 결과, 선두차량 내부에 압축기를 장착하여 전두부에서 흡입, 후미부에서 배출하는 방식의 열차 단수 압축기형(설계개념 1)이 공기저항과 객실 내 압력 변동 및 미기압파 등 모든 터널 공기력의 저감이 가능한 것으로 나타났으며, 선정된 설계개념 1에 대해서 압축기 입출구 면적과 터널 길이를 바꾸어가며 해석을 수행한 결과, 흡기구 면적이 열차 단면적의 30%이고, 흡기구 대비 배기구 면적이 80%인 경우를 최종 설계(안)으로 선정하였다. 최종 설계(안)의 평균 공기저항 저감율은 35.8%였으며, 승객 이명감 지표 저감율 14.5%, 미기압파 저감율 43.4%로서 객실 내 압력변동 및 미기압파를 모두 기준치 이하로 유지함을 알 수 있었다.				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 하이퍼루프형 압축기를 차량에 적용하는 방안이 열차가 고속으로 터널을 주행할 때 발생하는 공기력의 저감에 실효성 있음을 증명 - 터널 단면적의 확대 없이 터널 공기력을 저감하여 국내 고속선의 운영 속도를 400km/h로 비약적으로 증대시키는 데 활용함				
국문핵심어 (5개 이내)	고속열차	터널	공기저항	승객 이명감	전산유체역학
영문핵심어 (5개 이내)	High-speed train	tunnel	aerodynamic drag	ear discomfort	CFD

〈 목 차 〉

제 1 장 연구개발과제의 개요	1
제 1 절 연구개발의 배경 및 필요성	1
1. 연구개발의 배경	1
2. 연구개발의 필요성	1
제 2 절 연구개발의 목표 및 내용	4
1. 연구개발의 최종 목표	4
2. 연구개발의 세부 목표	4
3. 연차별 연구개발 목표 및 내용	4
제 2 장 연구수행내용 및 성과	6
제 1 절 고속철도에 대한 압축기 적용성 검토 및 선정	6
1. 개요	6
2. 압축기 요구사항 검토	7
3. 압축기 타입별 특징 분석을 통한 적용 모델 선정	9
4. 압축기 타입별 특징 분석을 통한 적용 가능 모델 선정	13
5. 소결	17
제 2 절 하이퍼루프형 압축기 적용 고속열차 공기역학 설계개념 연구	18
1. 개요	18
2. 설계개념 도출 방법	19
3. 설계개념 도출 결과	20
4. 소결	26
제 3 절 압축기 적용 고속열차 전용 CFD 해석 프로그램 개발	27
1. 개요	27
2. 압축기 적용 고속열차 해석을 위한 무격자 기법 개발	28
3. 압축기 모델링 기법 및 경계 조건 개발	35
4. 격자 연결정보를 사용하는 기존 세대 유동해석과 달리 질점만 이용한 해석기법 개발 및	

활용	42
5. 고속열차의 터널 통과 모사를 정확하고 효율적으로 처리하는 이동 질점법 개발	50
6. 소결	54
제 4 절 압축기 적용 고속열차 해석 프로그램(GUI) 개발	55
1. 개요	55
2. 그래픽 사용자 환경(GUI) 개발	56
3. 전후처리 환경	60
4. 개발 프로그램 실증	64
5. 소결	71
제 5 절 하이퍼루프형 압축기 적용 고속열차 공기역학 상세설계	72
1. 개요	72
2. 해석 조건	72
3. 축대칭 해석 결과	75
4. 3차원 해석 결과	89
5. 소결	93
제 6 절 결론	94
제 3 장 연구개발 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	96
제 1 절 연구개발 목표 및 달성도	96
1. 연구개발의 최종 목표	96
2. 연차 별 세부 연구목표 및 목표 달성도	96
3. 성과목표 달성도	98
제 2 절 관련 분야 기여도	99
제 4 장 연구개발결과의 활용계획	100
제 1 절 연구 결과의 활용 방안	100
제 2 절 기대성과 및 파급효과	100
붙임 1. 참고문헌	102
[부록] 해석 Case 별 결과	104

〈 표 목 차 〉

<표 2-1-1 압축기 성능조건 및 제약조건>	8
<표 2-1-2 압축기 타입별 장단점 비교분석 결과>	12
<표 2-1-3 모델3의 압축기 형상 데이터>	15
<표 2-1-4 기존 압축기 모델 성능조건 검토 결과>	16
<표 2-2-1 브레인 스토밍을 통해 도출된 컨셉 아이디어>	22
<표 2-2-2 형태소분석을 위한 구성요소 별 설계 대안>	23
<표 2-2-3 형태소분석을 통해 도출된 설계개념 후보>	25
<표 2-4-1 CentOS 및 Ubuntu 환경에서의 패키지 설치 명령어>	57
<표 2-4-2 GUI 트리메뉴의 입력 항목>	59
<표 2-4-3 승객 이명감에 대한 국제 기준>	66
<표 2-4-4 승객 이명감에 대한 국내 기준>	67
<표 2-4-5 개발 프로그램의 터널 공기력 해석 정확도>	71
<표 2-5-1 축대칭 해석 모델>	73
<표 2-5-2 설계개념 별 터널 공기력 저감 효과>	79
<표 2-5-3 토출구 면적에 따른 터널 공기력 저감 효과(열차속도 400km/h)>	83
<표 2-5-4 압축기 최종설계(안) 적용에 따른 터널 공기력 저감 효과>	88

〈 그림 목 차 〉

<그림 1-1-1 고속철도 시설 및 차량 교체시기 예상[3]>	1
<그림 1-1-2 압축기 적용 고속열차 공력설계기술 개발 개요>	3
<그림 1-2-3 연구개발 로드맵>	5
<그림 2-1-1 터널 내 고속열차 주행 시 차량 전두부 압축기 설치 효과>	6
<그림 2-1-2 축류압축기 유동 방향>	9
<그림 2-1-3 축류압축기의 로터와 스테이터 및 결합형태>	9
<그림 2-1-4 원심압축기 구조 및 유동방향>	10
<그림 2-1-5 원심압축기 주요 구성요소>	10
<그림 2-1-6 볼과 피니언이 결합된 기어박스>	11
<그림 2-1-7 다단 원심압축기 시스템 형상>	11
<그림 2-1-8 모델1의 자오면 형상 및 단면형상>	13
<그림 2-1-9 모델1 로터 · 스테이터 형상>	13
<그림 2-1-10 모델2 3차원 형상>	14
<그림 2-1-11 모델2 압축기 설계 데이터>	14
<그림 2-1-12 모델3의 전체 구성요소 조합>	15
<그림 2-2-1 압축기 적용 고속열차의 공기역학 설계개념 도출 절차>	19
<그림 2-2-2 하이퍼루프 파생 시스템>	21
<그림 2-2-3 전두부에 적용가능한 흡입/배출구 위치>	21
<그림 2-3-1 C-STA로부터 생성된 격자계 예시>	28
<그림 2-3-2 C-STA 형상 입력 예시>	29
<그림 2-3-3 벽면 경계점으로부터 생성된 벽면 질점계>	30
<그림 2-3-4 전하량이 동일한 질점계 (좌), 전하량을 곡률의 함수로 설정한 질점계 (우)>	30
<그림 2-3-5 겹침 부위 제거 및 외부 질점계 추가>	31
<그림 2-3-6 경계 질점으로 판정된 질점 (녹색)>	31
<그림 2-3-7 자동 구현된 해석 영역 형상>	32
<그림 2-3-8 개발된 형상 모델러>	33

<그림 2-3-9 C-STA 생성 격자계>	34
<그림 2-3-10 열차 무격자 질점>	34
<그림 2-3-11 터널 무격자 질점>	34
<그림 2-3-12 압축기 성능곡선 예시>	37
<그림 2-3-13 압축기 면적 구분을 위한 표면질점 조정>	38
<그림 2-3-14 압축기 유입구에서의 유동값 추적 예시>	38
<그림 2-3-15 압축기 경계조건 계산 프레임워크 모식도>	39
<그림 2-3-16 국부 질점군>	42
<그림 2-3-17 최소제곱법 정확도 평가를 위한 두 가지 격자계>	44
<그림 2-3-18 수치해석 방법에 따른 오차 수렴 특성>	44
<그림 2-3-19 kw-sst 난류모델 계산 과정>	48
<그림 2-3-20 NACA0012 익형에 대한 무격자 유동 해석용 질점계>	48
<그림 2-3-21 NACA0012 익형 유동 해석 결과>	49
<그림 2-3-22 RAE2822 익형 2차원 유동 해석 결과>	49
<그림 2-3-23 ALE 기법에 따라 변형된 격자 예시>	50
<그림 2-3-24 열차의 이동에 따른 질점계 재구성>	51
<그림 2-3-25 NACA0012 익형 비정상 진동 문제 해석 조건 개요>	52
<그림 2-3-26 NACA0012 익형 비정상 진동 문제 해석 결과>	52
<그림 2-3-27 터널 내 압력 분포 ($t=3\text{sec}$)>	53
<그림 2-3-28 터널 벽면 압력 변동 이력 (터널 입구로부터 462m 지점)>	53
<그림 2-3-29 압축기 경계조건 계산 프레임워크 모식도>	54
<그림 2-4-1 고속열차 해석 특화 GUI 제어 화면 구성>	58
<그림 2-4-2 형상 파라미터를 입력하여 열차 형상곡선 생성>	60
<그림 2-4-3 GUI 상에서 질점 생성 및 가시화>	61
<그림 2-4-4 유동 현상의 paraview 가시화를 위해 작성된 파이썬 스크립트>	62
<그림 2-4-5 스크립트를 통해 자동 생성된 x-t 선도>	62
<그림 2-4-6 해석 결과 x-t diagram>	63

<그림 2-4-7 해석 결과 미기압과 변동 이력>	64
<그림 2-4-8 검증 Case에 대해 생성된 해석 질점계>	65
<그림 2-4-9 경계층 질점>	65
<그림 2-4-10 검증 케이스의 압력 변동 이력 (470m)>	68
<그림 2-4-11 검증 케이스의 x-t 선도 비교>	69
<그림 2-4-12 검증 케이스의 미기압과 측정 결과 비교>	69
<그림 2-4-13 검증 케이스의 승객이명감 해석 결과 비교>	70
<그림 2-5-1 압축기 적용 여부에 따른 전두부 흡입구 경계조건>	73
<그림 2-5-2 3차원 해석 영역>	74
<그림 2-5-3 열차 주위 격자>	74
<그림 2-5-4 설계개념 별 전두부 주위 압력 분포(터널 진입 후 3초)>	76
<그림 2-5-5 설계개념 별 공기저항 변화>	77
<그림 2-5-6 설계개념 별 열차 내외부 압력 변화(1번째 객차)>	77
<그림 2-5-7 설계개념 별 터널 출구 미기압파>	78
<그림 2-5-8 해석 파라메타에 따른 평균 공기저항>	80
<그림 2-5-9 해석 파라메타에 따른 승객이명감 지표>	81
<그림 2-5-10 해석 파라메타에 따른 미기압파>	82
<그림 2-5-11 압축기 적용 여부에 따른 열차 전두부 주위 압력 분포($t=5.217$ sec)>	84
<그림 2-5-12 압축기 적용 여부에 따른 열차 후미부 주위 압력 및 속도 분포($t=5.217$ sec)>	85
<그림 2-5-13 압축기 적용 여부에 따른 공기저항 변화>	86
<그림 2-5-14 압축기 적용 여부에 따른 차량 내외부 압력 변동>	87
<그림 2-5-15 압축기 적용 여부에 따른 미기압파>	87
<그림 2-5-16 압축기 적용 여부에 따른 3차원 열차 주위 압력 분포 ($t = 0.41$ sec)>	89
<그림 2-5-17 압축기 적용 여부에 따른 3차원 열차 주위 압력 분포 ($t = 2.30$ sec)>	90
<그림 2-5-18 압축기 적용 여부에 따른 3차원 열차 주위 압력 분포 ($t = 5.94$ sec)>	90
<그림 2-5-19 압축기 적용 여부에 따른 공기저항 변화(3차원 해석)>	91
<그림 2-5-20 압축기 적용 여부에 따른 차량 내외부 압력 변동(3차원 해석)>	92
<그림 2-5-21 압축기 적용 여부에 따른 터널 미기압파(3차원 해석)>	93

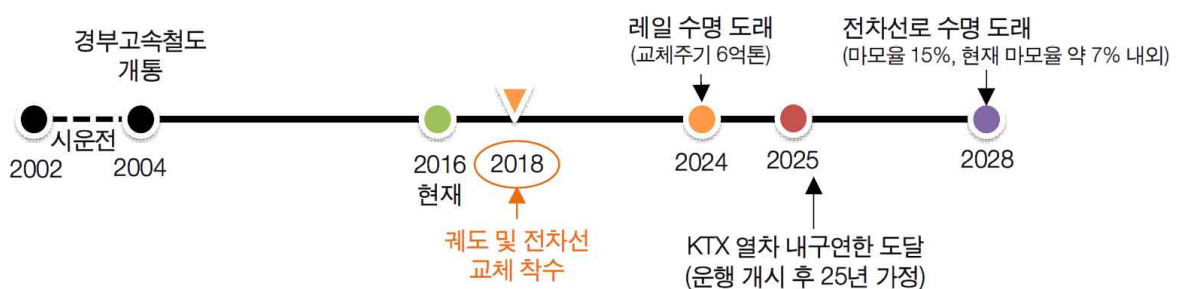
제 1장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 배경 및 필요성

1. 연구개발의 배경

고속철도가 가져온 교통혁명은 전국 주요 거점 간 이동시간을 2시간대로 단축시켰으며, 경부고속철도 2단계 완전 개통 후 철도의 장거리 교통수단 분담율은 62%까지 증가하였다[1]. 고속철도망의 구축으로 고속철도 정차도시의 지역 거점화, 지역 개발 여건 개선, 도시 상품성 향상, 신규 비즈니스 창출 및 산업구조 고도화 등 다양한 사회, 경제적 효과가 나타나고 있으며[2], 이러한 고속철도 도입에 따른 성과를 더욱 발전시켜 나갈 미래 중장기 전략의 수립이 필요한 실정이다.

현재의 고속철도를 발전시킬 여러 중장기 비전 중 고속철도의 운영속도 증가도 중요한 선택 중 하나이다. 고속철도로 인해 주요 역간 통행시간은 고속철도 도입 이전에 비해 비약적으로 감소하였지만, door-to-door 이동시간의 측면에서는 서울-부산은 4시간대, 서울-광주는 3시간대로서 아직도 개선할 여지가 많이 남아 있다. 이에 따라 경부고속철도 교체 수명의 도래에 맞추어 교체되는 선로시설, 전차선 및 차량의 성능을 400km/h에 맞춰 성능을 향상시켜 교체하여 주요 도시 간 고속철도 이동시간을 1시간 이내로 단축하고 이에 따라 door-to-door 이동시간을 2시간대로 단축하는 방안이 논의되고 있다[3].



<그림 1-1-1 고속철도 시설 및 차량 교체시기 예상[3]>

2. 연구개발의 필요성

고속철도 운영속도의 증가는 전차선과 선로의 개량, 차량의 고성능화 등 다양한 기술적 문제점들을 극복하여야 가능한 것인데, 그 중에서도 특히 공기역학적인 문제가 주로

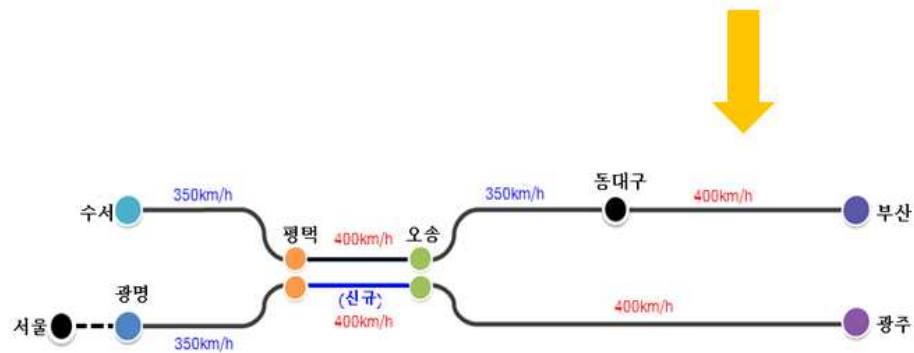
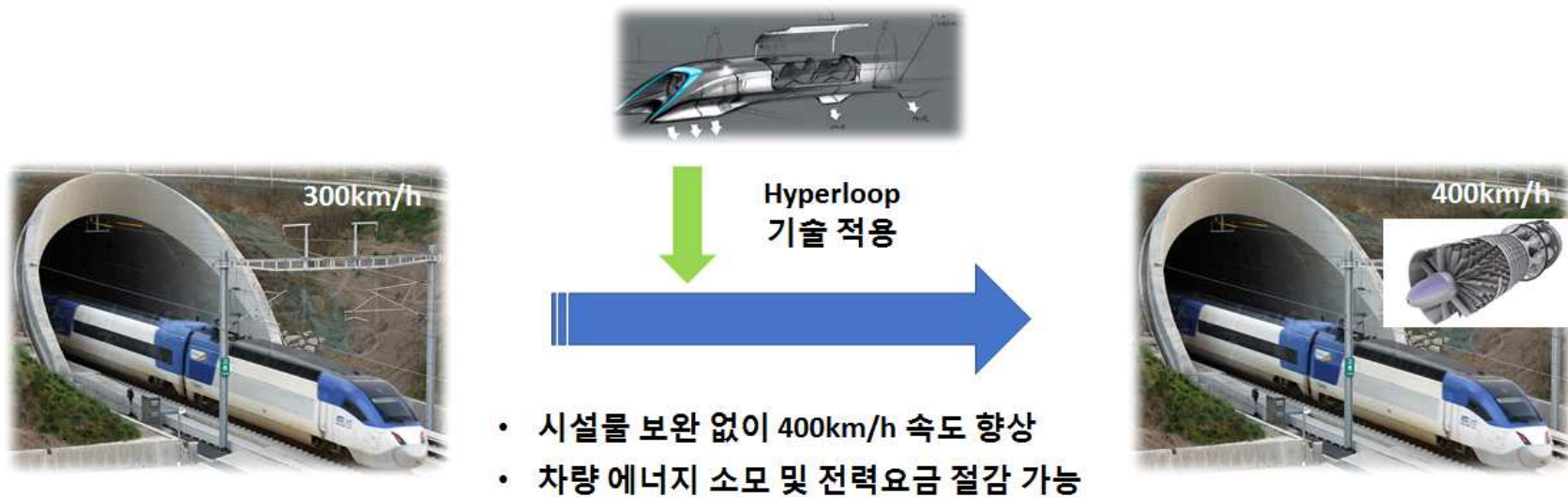
대두될 것으로 예상된다. 고속열차가 고속으로 주행할 때 열차 주위의 유동은 심하게 교란되며, 이로 인해 여러 가지 공기역학적인 문제가 야기되며, 때때로 일본 신칸센의 착설문제[4], 미기압파[5] 등과 같이 고속철도의 속도 증가의 심각한 제약요소가 되기도 한다. 특히, 열차가 터널을 통과하는 경우에는 개활지에서의 공기역학적인 문제가 더 심각해지거나 새로운 유형의 문제가 발생한다.

터널을 통과할 경우 열차 공기저항은 개활지에 비해 크게 증가하는데, KTX 열차의 경우 터널 통과 시에 공기저항이 개활지에 비해 평균적으로 30% 가량 증가하는 것이 실차를 이용한 타행시험을 통해 밝혀졌다[6]. 터널 내 압력변동과 미기압파는 터널 주행 시에 발생하는 고속철도 고유의 공기역학적 문제로서, 열차의 터널 진입에 따라 형성되는 압력파는 객실 내의 압력을 급격히 변화시켜 승객의 청각적 불쾌감을 유발하거나[5], 터널 출구에서 방사되는 미기압파의 원인이 되기도 한다[5,8]. 따라서, 터널 통과 시 발생하는 공기저항, 객실 내 승객이명감 및 미기압파의 증가의 문제는 운행 중인 터널의 단면적의 확대가 불가능함을 고려하면 반드시 해결해야 하는 문제라고 볼 수 있다.

한편, 미국의 사업가이자 발명가인 일론 머스크(Elon Musk)가 2013년 발표한 하이퍼루프[9]는 미래 초고속 운송기술로서 진공에 가깝게 기압을 낮춘 튜브 내부를 운송체가 음속에 가까운 속도로 이동하는 시스템이다. 하이퍼루프는 이전의 아음속 튜브를 이용한 초고속 운송시스템들에 비해 차량의 속도를 본질적으로 제한하는 칸트로비츠 한계(Kantrowiz limit)를 압축기를 이용하여 전방류를 흡입, 압축하는 방식으로 차량 주위로 우회하는 유동의 유량을 감소시킴으로써 해결하고자 하였다.

하이퍼루프와 유사하게 아진공튜브를 이용하는 초고속철도시스템인 튜브트레인의 개발을 위해 전산유체역학을 이용한 시뮬레이션을 이용하여 공기역학 개념설계 연구를 진행한 바가 있으나[10, 11], 이 시스템은 열차의 최대운영속도를 700km/h로 설정하여 칸트로비츠 한계 속도 이하에서 운영함으로써 속도 제약의 문제를 해결한 바 있다. 이후, 하이퍼루프 관련 연구는 한국철도기술연구원 등 출연연구기관들을 중심으로 활발히 진행되고 있으며, 특히 한국교통대학교는 전산유체해석 기술을 바탕으로 하이퍼루프 공력해석 및 설계 관련 연구를 수행 중이다[12].

본 연구에서는 미래 교통수단인 하이퍼루프에서 사용되는 압축기를 이용한 공기력 저감 기술을 고속열차에 적용하는 기술을 제안하여 운영속도 증가에 따른 터널 공기력 문제를 시설물 보강 비용이 없으면서 열차주행에 따른 에너지 소모도 저감할 수 있는 기술을 개발하여, 국가철도망의 운영속도를 400km/h로 증대시킬 수 있는 핵심 기술을 확보하고, 국민 교통편익의 증대 및 한국 고속철도차량기술의 위상을 높이고 고속철도차량 해외수출 경쟁력을 제고하고자 하였다.



국민 교통편익 증진
(주요도시 간 1시간 내 이동)



고속철도기술의 비약적 발전
글로벌 시장 경쟁력 강화

<그림 1-1-2 압축기 적용 고속열차 공력설계기술 개발 개요>

제 2 절 연구개발의 목표 및 내용

1. 연구개발의 최종 목표

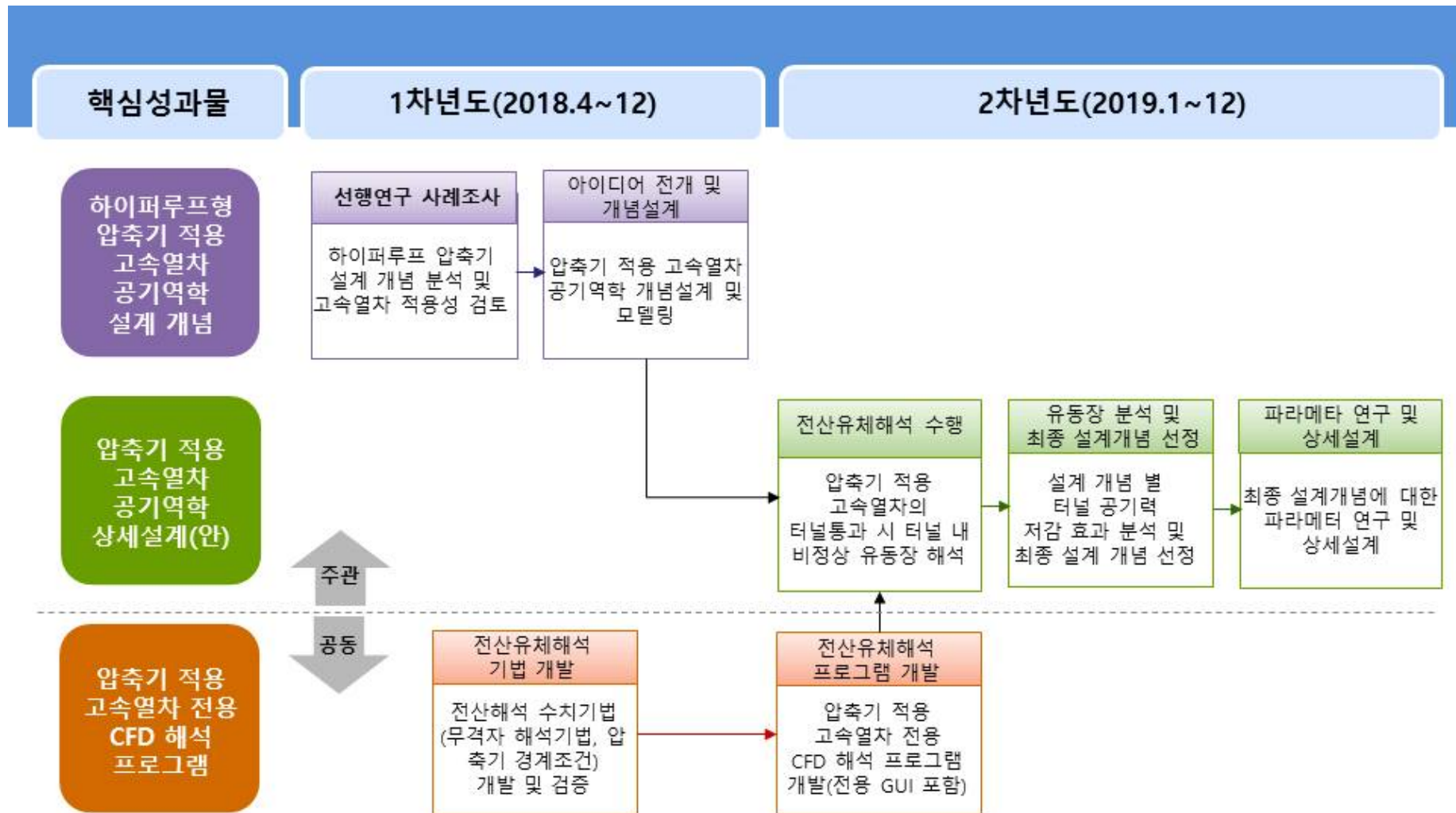
기존 고속선의 터널 단면적을 유지하면서 운행속도를 400km/h로 증속할 경우 발생하는 공기저항, 승객 이명감 및 미기압과 등 터널 공기력 문제를 해결하기 위해 하이퍼루프와 같이 압축기를 차량에 적용하여 공기력을 효율적으로 저감하는 기술 개발

2. 연구개발의 세부 목표

- 하이퍼루프형 압축기 적용 고속열차 공기역학 설계개념 제시
- 압축기 적용 고속열차 공기역학 상세설계(안) 제시
- 압축기 적용 고속열차 해석을 위한 무격자 기법 개발
- 압축기 적용 고속열차 해석 프로그램(GUI) 개발

3. 연차별 연구개발 목표 및 내용

연도	내용	주관연구기관(한국교통대학교)	공동연구기관(넥스트폼)
1차년도	개발 목표	-하이퍼루프형 압축기 적용 고속열차 공기역학 설계개념 도출	압축기 적용 고속열차 해석을 위한 무격자 기법 개발
	개발 내용 및 범위	-하이퍼루프 압축기 설계개념 분석 및 고속열차 적용성 검토 -압축기 적용 고속열차 공기역학 개념설계 및 모델링	-C-STATM를 활용한 형상 전처리 방법 개발 -압축기 모델링 기법 및 경계 조건 개발 -격자 연결정보를 사용하는 기존 세대 유동해석과 달리 질점만 이용한 해석기법 개발 및 활용 -고속 열차의 터널 통과 모사를 정확하고 효율적으로 처리하는 이동 질점법 개발
2차년도	개발 목표	-압축기 적용 고속열차 공기역학 상세설계(안) 제시	-압축기 적용 고속열차 해석 프로그램(GUI) 개발
	개발 내용 및 범위	-압축기 적용 고속열차의 터널통과 시 터널 내 비정상 유동장 해석 -설계개념 별 터널 공기력 저감 효과 분석 및 최종 설계개념 선정 -최종 설계개념에 대한 파라미터 연구 및 상세설계	-그래픽 사용자 환경(GUI) 개발 -전후처리 환경 개발



<그림 1-2-3 연구개발 로드맵>

제 2 장 연구수행내용 및 성과

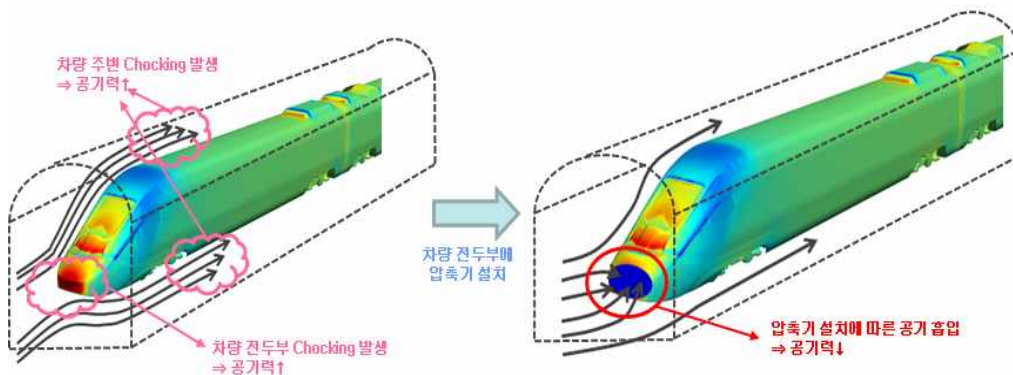
제 1 절 고속철도에 대한 압축기 적용성 검토 및 선정

1. 개요

터널 내에서 고속열차가 주행하는 경우 고속열차 차량의 단면적이 터널 전체 면적 대비 공기 유동의 단면적을 감소시키는 일종의 차폐율(Blockage Ratio, BR)이 작용하며, 이러한 차량 단면적에 의한 차폐율로 인하여 터널 내 주행 시 차량 주변을 통과하는 공기 유동의 유속이 증가하며, 차량 전방 및 주변 단면에서 유속이 급격히 증가하거나 심한 경우 유동이 정체되는 초킹(chocking)현상이 발생하여 항력이 증가하는 현상이 발생할 수 있다.

위와 같은 유속의 급격한 증가와 초킹 현상으로 인하여 발생된 항력의 증가를 완화하거나 방지하기 위해서는 차량 주변에 흐르는 유동이 원활히 흐를 수 있도록 유동 단면적을 증가시키거나 차량 전두부에서 유동을 강제적으로 흡입할 수 있는 장치가 필요하다. 유동 단면적의 증가를 위해서는 차폐율을 감소시키는 방법으로서 차량 단면적을 축소하거나 터널 단면적을 증가시키는 방법을 사용하여야 하나, 이와 같은 방법은 새로운 차량의 제작 및 터널의 재시공이 필요하므로 이미 개통되어있는 노선에서 변경하는 것이 현실적으로 불가능하다. 반면에 차량 전두부에서 공기 유동을 강제적으로 흡입할 수 있는 장치를 추가하여 차량 주변으로 통과하는 유동 중 일부를 흡입하게 된다면, 유량 중 일부를 감소시켜 차량 주변의 유동의 유속 감소 및 초킹현상 해소를 통하여 항력 감소 효과를 기대할 수 있다.

본 절에서는 터널 주행 시 주변 유동의 공기력 저감을 위하여 고속열차의 전두부에 설치하는 압축기의 설계를 위한 고속열차 운용조건을 검토하여 성능조건과 제약조건을 정리하고, 주요 압축기 타입의 기존 압축기 모델을 비교, 분석하여 이에 적합한 모델을 선정하였다.



<그림 2-1-1 터널 내 고속열차 주행 시 차량 전두부 압축기 설치 효과>

2. 압축기 요구사항 검토

가. 압축기 선정 사유

차량 주변의 원활한 유동을 위하여 차량 전두부에 유동을 강제적으로 흡입할 수 있는 장치를 추가하는 경우에는 차량 전방 공기의 강제 흡입뿐만 아니라 흡입된 공기를 압축하여 토출할 수 있는 블로워(blower)와 압축기(compressor) 형식의 적용을 고려할 수 있다. 먼저, 블로워의 경우 대부분 1단으로 구성되어 구조가 간단하고 적은 에너지를 소모하나, 압축비가 1.5 이하로 낮아 블로워를 통과한 유동 체적의 감소가 미미하여 블로워 후단 배관의 단면적이 흡입구의 단면적과 비슷하여 공간이 협소한 고속열차 차량 내부에 설치하는 것은 설계적으로 불리하다. 반면에, 압축기의 경우 블로워 대비 구조가 복잡하고 에너지 소모도 크나, 타입 및 단수 구성에 따라 시스템 압축비 2~20 범위에서 원하는 값을 얻을 수 있으므로 고속열차에 장착하는 경우 압축기 후단 배관의 단면적 감소와 차량 후단의 토출 노즐까지의 배관 차압을 고려하여 압축비 2.5~3.5 범위의 압축기를 적용할 수 있다.

본 연구에서 검토하는 고속열차 차량의 경우 성능 개선을 통하여 주행속도 400km/h로 터널 내부를 주행하는 것으로 가정하며, 터널 내부의 공기 유동은 차량 주행에 대한 상대운동을 하는 것으로 간주하여 유속 400km/h로서 111.11m/s의 속도를 적용하며 입구 공기조건은 일반적인 대기압(101.3kPaA), 상온(20℃)로 가정하였다. 또한, 차량의 형상정보는 기존의 고속철도 차량 형상의 제원을 활용하여 압축기가 설치되는 차량은 단면적 10m²에 길이 20m로 적용하여 압축기 설치 가능성 검토하였다.

나. 압축기 성능조건 및 제약조건 검토

압축기를 설계하거나 검토를 위한 필요조건으로 해당 압축기 시스템을 설계하기 위하여 압축기의 입·출구 정보 및 목표성능에 관한 성능조건과 압축기 시스템의 운용 과정에서 설치장소, 운전 시 유의사항 등에 의한 제약조건의 확인이 필요하다. 여기서, 압축기 성능조건 중 압축기의 설계를 위한 기본적인 정보로서 압축기 입·출구의 조건으로 위에 제시한 고속열차 운용조건을 기준으로 하여 압축기 성능조건 및 제약조건을 설정하였다.

압축기 입구 조건으로서 입구로 유입되는 공기는 대기압(101.3kPaA), 상온(20℃)의 상태로 유속은 111.11m/s(400km/h)로 압축기 흡입구로 유입되며, 압축기 출구 조건으로서 공기 토출압력은 압력 상승에 따른 공기 체적의 감소를 통하여 압축기 후단부터 차량 후방 토출노즐까지의 배관 직경 최소화과 동시에 배관 차압을 고려하여 2.5~3barA 정도로 설정하였으며, 위와 같은 조건에서의 압축기 시스템 전압력비는 2.5~3.5로 설정하였

다. 압축기 출구 공기 온도의 경우, 압축비를 고려하면 약 400~500K 사이로 예상되며, 온도의 상승으로 인하여 토출 공기의 체적이 증가하여 압축기 체적효율 감소와 토출 배관 직경 증가 등의 문제를 동반 할 수 있으므로, 이를 방지하기 위하여 압축기 토출 배관에 후방냉각기(aftercooler)를 적용하여 압축기 토출 공기의 온도를 40℃ 전후로 낮추어 차량 후방 노즐에서 토출된 압축 공기의 온도를 상온 범위에서 제어할 수 있어야 한다.

또한, 압축기 제약조건의 핵심은 고속열차 차량 내부에 해당되는 압축기 모델의 설치 가능 여부로 기존 고속열차 차량의 최전방 차량은 운전석과 각종 기계장치가 설치되어 있어 내부가 매우 조밀하여 압축기 설치공간을 최소화할 수 있어야 하므로 검토하는 압축기의 형상제원이 차량 내부에서 설치하지 못할 정도로 크면 선정 과정에서 제외하였다. 이에 초기 선정 과정에서는 차량 단면적인 10m²의 10%를 초과하지 않도록 압축기의 최대 직경을 1.0m로 제한하며, 길이는 차량 길이인 20m의 10~15% 범위에 해당하는 2.0~3.0m 범위에서 검토하였다. 단, 실제 열차 전두부 및 후미부에 설치되는 흡입 및 토출구의 면적은 축소, 확장 노즐을 적용하여 압축에 소모되는 에너지의 회수를 전제하고 있으므로 열차 단면적의 약 30%까지 확대 가능하다.

이상과 같은 고속열차 운용조건에 따른 압축기의 성능조건 및 제약조건을 검토하여 정리한 내용을 아래 표 2-1-1에 나타내었다.

<표 2-1-1 압축기 성능조건 및 제약조건>

압축기 조건	항목	단위	값	비고
입구조건	압력	kPaA	101.3	표준대기압
	온도	℃	20.0	상온
	유속	m/s	111.11	400km/h
출구조건	압력	barA	2.5~3.0	
	온도	℃	40	후방냉각기 적용
	시스템 전압력비	-	2.5~3.5	
제약조건	직경	m	1.0	단면적 10% 미만
	길이	m	2.0~3.0	모터 등 포함

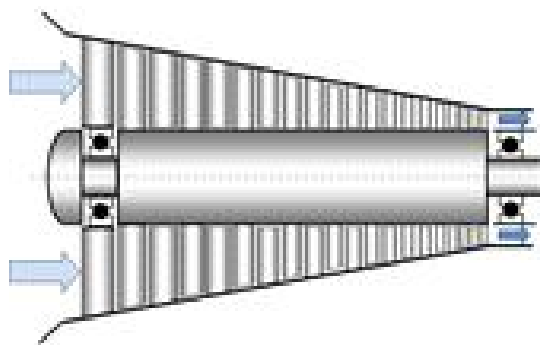
3. 압축기 타입별 특징 분석을 통한 적용 모델 선정

현재 주로 사용되는 압축기의 타입으로는 복동압축기(reciprocating compressor), 축류압축기(Axial compressor), 원심압축기(Centrifugal compressor), 사류압축기(Screw compressor) 등이 있다. 고속철도 차량에 적용하기 위한 용량과 형태, 국내 개발현황 등을 고려하여 축류압축기와 원심압축기를 검토 타입으로 선정하였으며, 두 압축기의 특징은 아래와 같다.

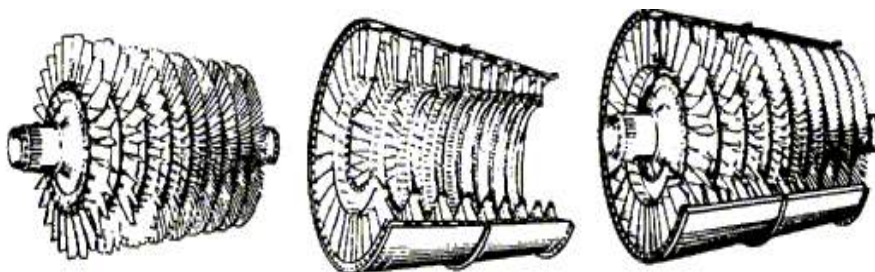
가. 축류압축기

축류압축기는 모터의 회전축에 회전부인 로터(rotor)가 장착되어 있고, 압축기 케이스에 고정부인 스테이터(stator)가 장착되어 있다. 1개의 로터와 스테이터를 1개의 단(stage)으로 나타내며, 일반적으로 단별 압축비는 1.1~1.7의 범위이다.

축류압축기의 특징으로서 흡입과 토출의 유동방향이 동일한 구조로 모든 단이 동일한 회전축에 위치하고, 모터와 직결되어 회전하므로 단 수에 관계 없이 모든 단이 동일한 회전수로 회전하여 유입된 공기에 대하여 회전축의 고속회전에 의하여 로터에서 유속을 증가시켜 동압을 생성하나 각 단의 로터 직경이 다르므로 회전속도는 후단으로 갈수록 감소되어 유속을 감소시킴으로써 동압을 정압으로 전환하여 기체 압력을 증가하여 압축하는 구조이다.



<그림 2-1-2 축류압축기 유동 방향>

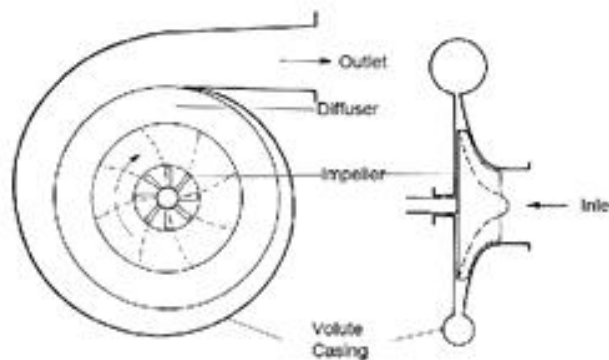


<그림 2-1-3 축류압축기의 로터와 스테이터 및 결합형태>

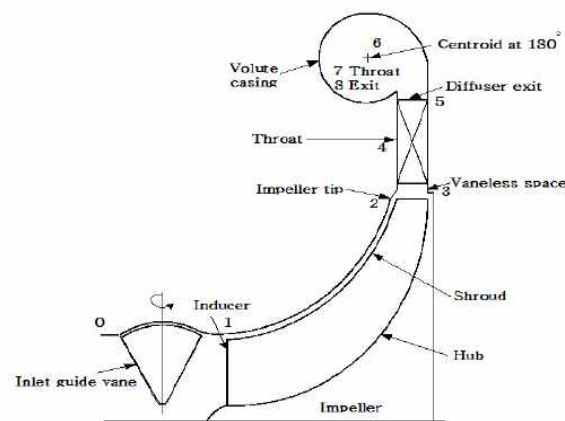
나. 원심압축기

원심압축기는 회전축에 회전부인 임펠러(impeller)가 장착되어 있고, 임펠러 후단에 고정부인 디퓨저(diffuser)가 장착되어 있으며, 디퓨저에서 원주방향으로 토출된 유동을 한 방향으로 정리하여 뒤쪽의 배관과 연결하는 스크롤(scroll) 또는 벌류트(volute)가 존재한다. 임펠러로부터 스크롤 또는 벌류트까지를 합쳐 단(stage)으로 나타내며, 일반적으로 단별 압축비는 1.3~3.0 범위이다.

원심압축기 특징은 흡입과 토출의 유동방향이 수직이며, 흡입시에는 공기가 수직의 축방향으로 흡입되어 회전축의 고속회전에 의하여 임펠러에서 유속을 증가시켜 원주방향으로 유동을 진행시키면서 동압을 생성하고 토출시에는 회전축의 회전에 의하여 디퓨저에서 유속을 감소시킴으로써 동압을 정압으로 전환하여 원주방향으로 토출되어 기체 압력을 증가시킨다.



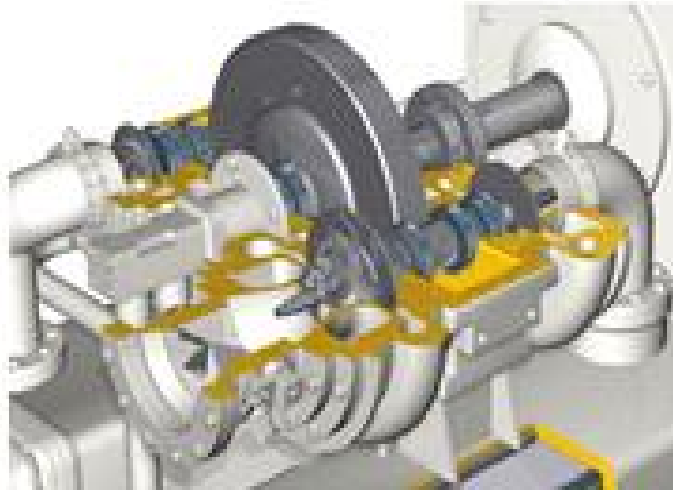
<그림 2-1-4 원심압축기 구조 및 유동방향>



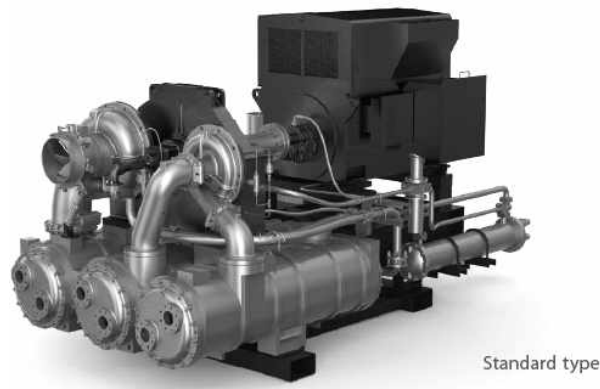
<그림 2-1-5 원심압축기 주요 구성요소>

축류압축기와 비슷하게 1단 구성인 경우에는 모터와 단을 직결하기도 하나, 일반적인 다단 구성인 경우에는 모터 회전축과 볼(Bull gear)을 연결하고, 각 단은 피니언(Pinion

gear)에 장착하여 볼과 피니언을 기어 연결하여 구동하는 형식으로 작동한다. 이러한 볼과 피니언의 기어 연결 시 치수(teeth number) 조합 조정을 통하여 각 단의 최적 회전 속도에 근접한 회전수를 도출할 수 있어 단별 성능 최적화 구현 가능하나, 볼과 피니언을 포함한 기어박스(gear box)의 크기가 증가하고, 원심압축기의 경우 각 단 사이에 중간냉각기(intercooler)를 설치하는 것이 일반적이므로 전체 시스템의 크기 증가 정도를 확인해야 할 필요가 있다.



<그림 2-1-6 볼과 피니언이 결합된 기어박스>



<그림 2-1-7 다단 원심압축기 시스템 형상>

다. 압축기 타입별 장단점 비교분석

위의 도출 과정 및 결과를 통하여 축류압축기의 경우 단별 압축비가 1.1~1.7 정도로 상대적으로 낮아 1단으로 구성된 경우에는 앞에서 정의한 압축기 성능조건 중 시스템 전압력비(2.5~3.5)를 만족하지 못하는 것으로 예상되어 1단 축류압축기 타입은 압축기 성능조건 불만족으로 압축기 타입 검토 대상에서 제외하였다.

아래 표 2-1-2에 압축기 주요 타입 중 다단 축류압축기, 1단/다단 원심압축기에 대하

여 위의 성능조건 및 제약조건을 비교 및 분석하여 나타내었다. 검토 결과, 다단 원심압축기의 경우 기어박스과 중간냉각기, 모터 등의 주변 장치들로 인하여 설치공간이 많이 필요한 것으로 판단되며, 공간 제약이 중요한 고속철도 차량 내부 압축기로서 사용하기 어려우므로 압축기 제약조건에 적합하지 않으므로, 추후 비교분석에서는 제외하였다.

<표 2-1-2 압축기 타입별 장단점 비교분석 결과>

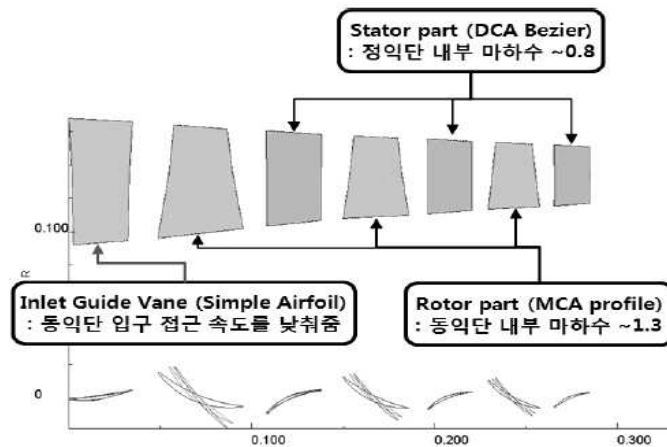
항목	다단 축류압축기	1단 원심압축기	다단 원심압축기
구조적 특징	동일 축상에서 공기 흡입/토출	공기 흡입과 토출 수직방향	기어 조합 가능 ⇒단별 최적 회전속도 가능
장점	장비 단면적·설치공간 최소화	단별 고압축비 가능 단수 및 길이 최소화	단별 최적성능 구현 가능
단점	단별 압축비 제약 ⇒ 단수 증가→ 길이 증가	고압축비로 효율 ↓ 회전부 직경 ↑→단면적 ↑	기어박스(볼+피니언), 중간냉각기 등 설치공간 증가
차량 내 설치 가능성	단면적 최소화 유리 길이 증가 우려	길이 최소화 유리 단면적 증가 우려 입출구 수직 배관 문제	설치공간 증가 우려 ⇒ 고속철도 적용 불가

위의 조건들 중 다단 축류압축기 중 제시된 압축기 성능조건을 만족하면서 제약조건도 초과하지 않는 모델을 검토한 결과, 한국항공우주연구원에서 개발한 항공기 엔진용 3단 천음속 축류압축기[13]를 검토대상으로 선정하여 이를 ‘모델1’로 정의하였다. 1단 원심압축기 중 압축기 성능조건을 만족하면서 제약조건을 만족할 수 있는 모델을 검토한 결과, 압축기 회전부의 직경이 0.5m 이내에 드는 모델에 대하여 검토를 진행하여 LG전선(주) 기계연구소에서 개발한 R134a용 터보냉동기의 원심압축기[14]와 경희대학교 주관으로 개발한 HFC-R134a용 원심압축기[15]를 검토 모델로 선정하여 각각 ‘모델2’, ‘모델3’으로 정의하였다.

4. 압축기 타입별 특징 분석을 통한 적용 가능 모델 선정

가. 모델1 : 항공기 엔진용 3단 천음속 축류압축기

모델1은 한국항공우주연구원에서 개발한 항공기 엔진용 3단 천음속 축류압축기로서 3단 구성으로 3개의 로터와 3개의 스테이터로 구성되어 있고, 20,000rpm의 회전속도로 회전하면서 공기를 흡입하여 압축할 수 있다. 모델1의 경우, 시스템 전압력비는 2.5, 질량 유량은 9.9kg/s로 확인되어 본 연구에서 요구하는 압축기 성능조건인 시스템 전압력비 2.5~3.5를 만족하며, 차량 내 설치 가능성에 대하여 검토한 결과 압축기의 최대 직경은 0.4m, 길이는 0.3m 이내이며, 축방향으로 연결되는 축류압축기의 모터 및 후방냉각기 배치를 고려하면 전체 압축기 시스템의 크기는 폭 1.0m, 길이 3m 이내로 제약조건도 만족하였다.



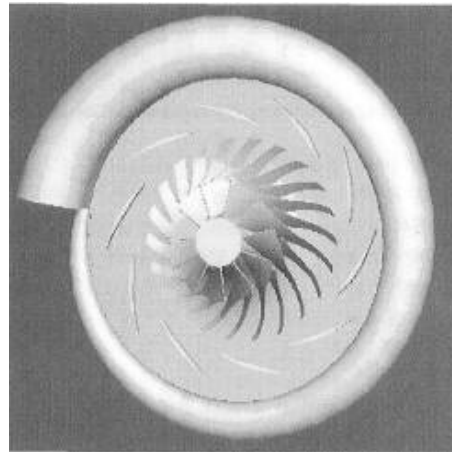
<그림 2-1-8 모델1의 자오면 형상 및 단면형상>



<그림 2-1-9 모델1 로터·스테이터 형상>

나. 모델2 : R134a용 터보냉동기의 원심압축기

모델2는 LG전선(주) 기계연구소에서 개발한 R134a용 터보냉동기의 원심압축기로서 1단 구성으로 임펠러와 디퓨저, 벌류트 1개씩으로 구성되어 있으며, 임펠러는 11,563rpm으로 회전하면서 공기를 흡입하여 압축할 수 있다. 모델2의 경우, 시스템 전압력비는 2.9, 질량유량은 20.2kg/s로 확인되어 본 연구에서 요구하는 압축기 성능조건인 시스템 전압력비 2.5~3.5 만족하지만, 차량 내 설치 가능성에 대하여 축기의 임펠러 직경은 0.2m, 벌류트 직경은 0.4m 정도로 확인되며, 전체 시스템 형상에 대한 구체적 제원은 제시되어 있지 않아 압축기 공력부(임펠러, 디퓨저, 벌류트) 사이즈를 바탕으로 전체 압축기의 크기를 추정하였다. 공기의 흡입·토출이 수직방향인 원심압축기의 특성에 따른 수직방향으로의 토출배관 연결과 이로 인한 압축기 공력부와 모터의 하단에 배치되는 후방냉각기와 오일탱크 등의 구조를 고려하면 전체 압축기 시스템의 크기가 커져도 제약조건을 만족할 수 있을 것으로 예상은 되나, 폭 1.0m 범위의 만족 여부는 불확실하였다.



<그림 2-1-10 모델2 3차원 형상>

r_{1b}/r_2	0.2457	AOA[deg]	4.0
r_{1b}/r_{1s}	0.4201	σ	0.98
β_{1s} [deg]	-57.94	r_6/r_2	1.6278
Z_{hub}/Z_{split}	11/11	b_6/b_2	0.9
b_2/r_2	0.0962	AR	0.4297
t_{ctr}/b_2	0.02553	N_s	0.65
β_2 [deg]	-45	ϕ	0.186
t_2/b_2	0.1532	μ	0.677
r_3/r_2	1.15	$\eta_{imp,tt}$ [%]	93.2
b_3/b_2	0.90	η_{tt} [%]	84.5
r_5/r_2	1.4375	pr_{tt} [%]	2.92
b_5/b_2	0.9	W_{shaft} [kW]	546.25

<그림 2-1-11 모델2 압축기 설계 데이터>

다. 모델3 : HFC-134a용 원심압축기

모델3은 경희대학교와 서울대학교 공동으로 개발한 HFC-R134a용 원심압축기로서, 1단으로 구성되어 있으며 200RT급 냉동기의 일부 구성요소로써 24,400rpm으로 회전하면서 공기를 흡입하여 압축한다. 모델3의 경우, 시스템 전압력비는 2.9, 질량유량은 4.9kg/s로 확인되어 본 연구에서 요구하는 압축기 성능조건인 시스템 전압력비 2.5~3.5 만족한다. 아래 그림 2-1-13의 표에 압축기 전체 시스템에 대한 상세 사양을 확인할 수 있으며, 차량 내 설치 가능성에 대하여 검토한 결과, 압축기 공력부 최대직경은 0.5m 정도로 예상되나 압축기 시스템의 형상제원의 값은 대부분 1m를 초과하여 제약조건을 만족하지 못할 것으로 예상되며, 설계변경을 실시하여도 한계치에 근접할 것으로 예상되었다.



<그림 2-1-12 모델3의 전체 구성요소 조합>

<표 2-1-3 모델3의 압축기 형상 데이터>

Item		Unit	Value
Impeller	Type	-	Shrouded
	Speed	rpm	24400
	Outer diameter	mm	160
	Blade number	EA	8+8
	Specific speed	-	48.1
Diffuser type		-	Vaneless
Inlet guide vane		EA	7
Gear	Helical teeth	EA	200
	Pinion teeth	EA	29
	Teeth ratio	-	6.9
Motor	Power source	ϕ-V-Hz	3-3300-60
	Nominal output	kW	140
	Speed	rpm	3540
Dimension	Height	mm	1,096
	Width	mm	1,238
	Length	mm	1,847

라. 성능조건 검토 결과

아래 표 2-1-3에 기존 압축기 모델의 성능조건 및 제약조건의 검토 결과를 나타내었다. 고속열차 차량 적용 압축기의 핵심 성능조건인 시스템 압력비(2.5~3.5)의 만족여부에 대하여 후보 모델들에 대하여 검토한 결과, 모델1~모델3 모두 성능조건을 만족하였으나, 고속열차 차량 내부에 압축기를 설치하기 위한 제약조건인 압축기 최대직경의 만족 여부에 대하여 검토한 결과 다단 축류압축기인 모델1만 제약조건을 안정적으로 만족하였으며, 이외에 1단 원심압축기인 모델2, 모델3에 대하여 검토한 결과, 벌류트까지의 압축기 단의 크기는 최대직경과 길이 모두 만족하나, 모터, 후방냉각기, 오일탱크 등의 부속 요소들을 고려하면 최대길이는 2.0m 이내로 만족하지만 최대직경은 1.0m를 초과할 것으로 예상되어 제약조건을 만족하지 못할 것으로 판단되었다.

<표 2-1-4 기존 압축기 모델 성능조건 검토 결과>

항목	모델1 (다단 축류압축기)	모델2 (1단 원심압축기)	모델3 (1단 원심압축기)
검토 모델	항공기 엔진용 3단 축류압축기[13]	R134a용 터보냉동기의 원심압축기[14]	HFC-134a용 원심압축기 [15]
성능조건 만족여부 (압축비 2.5~3.5)	시스템 압축비 2.5	시스템 압축비: 2.9	시스템 압축비 2.9
제약조건 만족여부 (최대직경, 최대길이)	최대직경: 0.4m 최대길이: 0.3m+α	최대직경: 1.0m 초과 예상 최대길이: 1.5~1.8m 예상	최대직경: 1.0m 초과 최대길이: 1.8m 정도
차량 내 설치 가능성	만족 예상	불만족 예상	불만족 예상

5. 소결

본 연구에서는 고속열차가 터널을 통과할 때 발생하는 터널 공기력 등을 저감할 수 있는 방안으로 블로워와 압축기 형식을 검토하여 고속열차에 압축기를 부착하는 것의 가능성을 살펴보기 위하여 기존 압축기 타입을 분석하여 후보 모델 3종을 선정하고 이들 모델에 대한 비교검토를 실시하여 최종적으로 고속열차에 적용할 모델 1종을 선정하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 압축기 타입별 용량과 형태, 국내 개발현황 등 특징 비교분석을 통하여 1단 축류압축기 및 다단 원심압축기를 제외하고, 다단 축류압축기 및 1단 원심압축기 타입의 후보 모델 3종을 선정하였다.
- 고속철도에 적용하기 위한 압축기 후보 모델 3종에 대하여 압축기 성능조건과 제약조건의 비교검토를 수행하여 철도차량 내부에 탑재 가능한 최대직경 0.4m, 최대길이 0.3m 정도인 다단 축류압축기인 ‘항공기 엔진용 3단 천음속 축류압축기’를 고속열차 적용에 가장 적합한 압축기로 선정하였다.

제 2 절 하이퍼루프형 압축기 적용 고속열차 공기역학 설계개념 연구

1. 개요

하이퍼루프에 적용되는 압축기는 전방의 공기를 압축시켜 후방으로 배출함으로써 전두부 근방의 높은 압력을 감소시키고, 튜브와 포드 사이의 좁은 유로를 통과하는 유량을 줄이기 때문에 유로 속도의 증가 및 이로 인한 충격파의 발생을 억제하는 역할을 하며, 결과적으로 공기저항을 저감할 수 있다.

고속열차의 경우, 압축기의 적용으로 전두부 근방의 압력이 감소하면 터널 진입 시 발생하는 진입압축파의 크기 및 구배가 감소하기 때문에 터널 통과 시 발생하는 승객이 민감과 터널 출구에서 방사되는 미기압파가 감소할 것으로 예상된다. 압축기 적용으로 공기저항의 저감도 가능할 수 있다. 하이퍼루프의 경우에는 천음속 영역에서 발생하는 충격파를 억제하여 초킹(chocking)을 방지하는 원리로 공기저항을 저감하는 효과가 발생하는데, 고속열차의 주행속도는 아음속 영역에 해당하기 때문에 하이퍼루프와 동일한 원리로 공기저항을 저감하는 것을 기대할 수는 없다. 하지만, 터널주행 시 개활지에 비해 공기저항이 증가하는 것이 전두부 근방의 높은 압력에 의한 압력저항의 증가와 열차 측면에서의 빨라진 유속에 의한 마찰저항의 증가가 주요 원인임을 감안할 때 압축기로 인해 전두부 근방의 압력이 감소하고, 열차 측면에서의 유속에 감소한다면 압축기 적용에 의해 고속열차의 공기저항의 감소도 가능하다.

고속열차에 압축기를 적용하기 위해서는 하이퍼루프와 다른 고속열차의 특성을 고려하여야 한다. 하이퍼루프는 단일한 포드(pod) 혹은 차량(vehicle)이 주행하는 반면, 고속열차는 여러 대의 차량이 연결되어 운행하기 때문에 열차의 길이가 100m에서 400m로 하이퍼루프에 비해 매우 길다. 또한, 터널 내에서만 주행하는 것이 아니라 터널에 진입, 통과, 진출 등 다양한 외부환경의 변화를 겪는다. 따라서, 압축기의 열차 내 배치, 흡입구 및 배출구의 위치에 대한 설계 개념을 도출하는 것이 필요하다.

본 절에서는 고속열차의 터널 공기력 저감을 위한 압축기 적용의 다양한 컨셉 아이디어를 브레인스토밍 등의 기법으로 도출하고, 형태소 분석기법을 통하여 아이디어를 체계적으로 전개하여 최종적으로 3가지 타입의 하이퍼루프형 압축기 적용 고속열차 설계개념을 도출하였다.

2. 설계개념 도출 방법

가. 설계개념 도출 절차

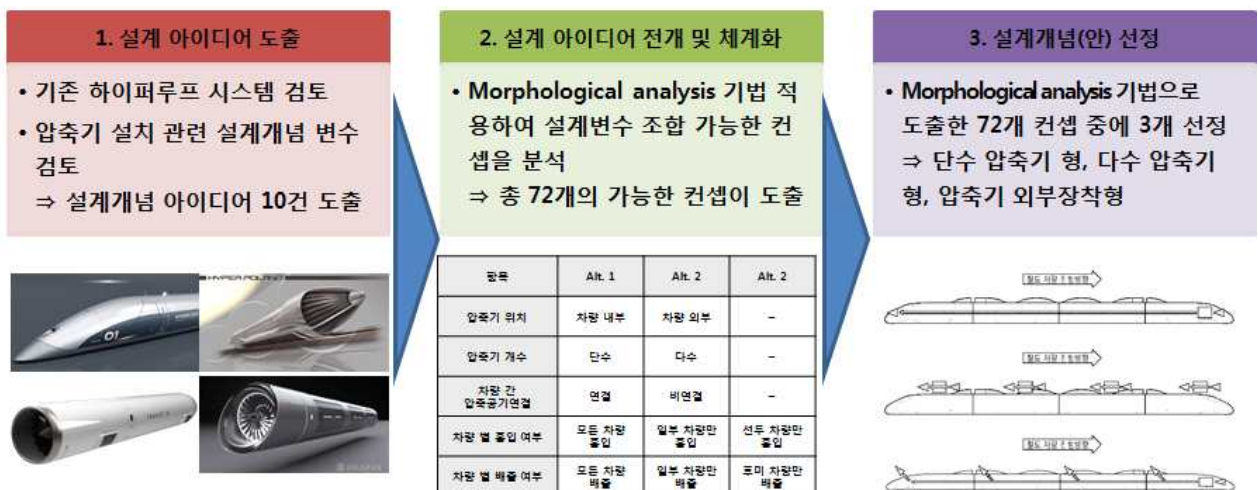
본 연구에서의 연구방법을 아래 그림 2.1에 나타내었다. 터널 공기력 저감을 위한 압축기 적용 고속열차의 공기역학 설계개념 도출을 위하여 아래의 3가지 절차를 통해 연구를 수행하였다.

- ① 기존 하이퍼루프 시스템 검토 및 압축기 설치 관련 설계변수 검토를 통한 설계개념 아이디어 도출
- ② Morphological analysis를 이용한 설계아이디어 전개 및 체계화
- ③ Morphological analysis를 이용해 도출된 설계대안 중 설계개념(안) 선정

먼저, 첫 번째 단계에서는 기존 하이퍼루프 시스템에 적용된 압축기 형상과 부착위치 등을 검토하고, 압축기 설치 관련 다양한 설계변수를 도입하여 10개의 설계개념 아이디어를 도출하였다. 다양하고 창의적인 아이디어의 도출을 위하여 설계 아이디어의 도출 단계에서는 참여 연구원들이 집단적으로 토론하는 브레인스토밍 방식을 이용하였다.

두 번째로 1차적으로 도출된 설계개념 아이디어를 분석하여 설계개념의 설계 요소들과 그 대안들을 추출한 뒤 이를 체계적으로 전개하는 방식인 형태소분석기법(Morphological analysis)을 이용하여 설계개념을 도출하였다.

마지막으로 형태소분석기법을 통해 이론적으로 도출가능한 72개의 조합 중 최적의 설계조합 3종을 선택하여 개념설계(안)으로 제시하였다.



<그림 2-2-1 압축기 적용 고속열차의 공기역학 설계개념 도출 절차>

나. 형태소분석기법(Morphological analysis)

형태소분석기법이란 형상 및 형태에 관한 해석을 실시하여 다차원적 문제의 전체 상관관계를 해석 및 분석하는 기법으로 각각 분석된 형태소를 통하여 새로운 형상을 만드는 분석기법이다. 이 기법은 1700년대의 문제 해결방안을 열거하고 분석하는 방식의 대안으로 Zwicky[16]가 1960년대 중반에 적용된 디자인의 형태소분석기법 및 1969년에 발표된 관련 논문 분석을 통하여 과정을 공식화한 내용을 기반으로, 설계 결과를 도출하는 기술로 발전하였다.

일반적인 형상의 형태소분석기법은 다음 3개의 과정으로 요약할 수 있다.

- 전체 디자인 문제를 간단한 하위문제로 나눔
- 각각의 하위문제에 대한 해석개념을 만들
- 하위문제 해석기법을 다른 전체 솔루션들에 체계적 결합 후 조합을 평가

이상과 같이 형태소분석기법은 시스템의 다양한 구성요소들을 체계적으로 조합할 수 있도록 하는 분석 방법으로서 시스템의 구성요소 별로 선택 가능한 대안들을 매트릭스로 구성하여 조합 가능한 시스템을 직관적으로 선택 가능하다는 장점이 있다.

3. 설계개념 도출 결과

가. 설계개념 아이디어 도출

압축기 적용 고속열차의 설계개념 아이디어 도출을 위하여 하이퍼루프 파생 시스템(Hyperloop-inspired system)을 조사하였다. 하이퍼루프 파생 시스템(Hyperloop-inspired system)이란 하이퍼루프 알파문서[17]의 발표 이후 연이어 설립된 스타트업 기업들이 각자 구상하고 있는 시스템을 의미한다. 아래 그림 2-2-2에는 다양한 종류의 하이퍼루프 파생시스템을 나타내고 있다.

아래 그림들에서 대부분의 시스템 컨셉은 차량 전두부에 압축기가 설치되어 있음을 알 수 있다. 그림 2-2-2 (a), (b), (c)에 나타난 Transpod, Hyper Poland 및 Zeleros 컨셉은 원형의 몸체에 차량 단면적과 거의 일치하는 단면적의 흡입구가 적용되었다. 하지만, 그림 2-2-2 (d)에 나타난 HTT 3차 프로토타입의 경우에는 흡입구의 면적이 차량 단면적에 비해 매우 작게 설계된 것을 볼 수 있으며, 이는 압축기의 바이패스 유동 저감 효과를 일부분만 적용하려는 의도로 생각할 수 있다.

이상의 기존 컨셉 조사를 통해 압축기를 고속열차의 전두부의 일부 면적에만 적용하는 것도 가능함을 알 수 있었고, 고속열차의 전면은 운전실창, 연결기, 충격흡수장치 등

다양한 설계 고려사항들이 있음을 감안하여 열차 전두부의 일정 단면적을 통해 공기를 흡입하는 것이 가능할 수 있을 것으로 판단했다.



(a) Transpod proto-type



(b) Hyper Poland



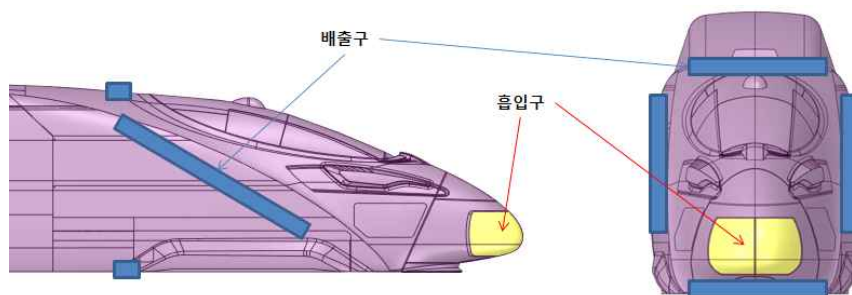
(c) Zeleros



(d) HTT 3rd capsule proto-type

<그림 2-2-2 하이퍼루프 파생 시스템>

압축기 설치 위치나 흡입구 위치를 고속열차 전두부에 어떻게 적용하는가에 따라 다양한 설계개념이 도출될 수 있다. 아래 그림 2-2-3에는 전두부에 적용가능한 다양한 흡입/배출구 위치를 검토하였다.



<그림 2-2-3 전두부에 적용가능한 흡입/배출구 위치>

이상과 같은 검토 후 참여 연구원들의 브레인 스토밍을 통해 아래와 표 2-2-1과 같이 10개의 컨셉을 도출하였다.

<표 2-2-1 브레인 스토밍을 통해 도출된 컨셉 아이디어>

number	concept name	figure
Concept01	단수흡입/단수분사형	
Concept02	단수흡입/다수분사형(차량 상면 분사)	
Concept03	단수흡입/다수분사형(차량 측면 분사)	
Concept04	단수흡입/다수분사형(차량 양측면 분사)	
Concept05	단수 압축기 선두차량형	
Concept06	압축기 차량 상면 외부장착형	
Concept07	압축기 차량 측면 외부장착형	
Concept08	압축기 차량 양측면 외부장착형	
Concept09	다수 압축기 차량 분리형	
Concept10	다수 압축기 차량 연결형	

나. 형태소분석을 통한 아이디어 전개

설계 아이디어의 전개와 체계화를 위하여 형태소분석기법을 이용하여 분석을 수행하였다. 먼저, 앞 절에서 도출된 10개 아이디어의 특징을 분석하여 시스템 구성요소를 압축기 위치, 압축기 개수, 차량 간 압축공기 연결, 차량 별 흡입 여부, 차량 별 배출 여부 등 5개로 선정하였다. 또한 각 구성요소 별로 적용 가능한 대안을 2 ~ 3개를 선정하여 총 72개의 설계개념을 도출하였다. 아래 표 2-2-2에는 이상에서 설명한 시스템 구성요소 및 각 구성요소 별 설계 대안을 나타내고 있다.

<표 2-2-2 형태소분석을 위한 구성요소 별 설계 대안>

구성요소	Alt 1	Alt 2	Alt 3
압축기 위치	차량 내부	차량 외부	-
압축기 개수	단수	다수	-
차량 간 압축공기 연결	연결	비연결	-
차량 별 흡입 여부	모든 차량 흡입	일부 차량만 흡입	선두 차량만 흡입
차량 별 배출 여부	모든 차량 배출	일부 차량만 배출	후미 차량만 배출

다. 설계개념(안) 선정

앞 절에서 형태소분석기법을 이용하여 도출한 72개의 설계개념 후보 중 압축기 차량 외부 위치와 차량 간 압축공기 연결조합 등 불가능한 대안 제외하고, 터널 공기력 저감 효과, 차량 적용성 등 조합 별 장단점을 분석하여 최종적으로 3개의 설계개념(안)을 선정하였다. 선정된 설계개념(안)의 세부 내용은 아래 표2-2-3에 나타나 있다.

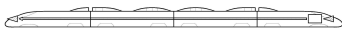
먼저, 첫 번째 설계개념(안)은 열차 단수 압축기형으로서 선두차량 내부에 압축기를 장착하여 전두부에서 흡입, 후미부에서 배출하는 방식이다. 공기저항 저감 효과 측면에서 이 컨셉은 전두부 공기 흡입에 의해 공기저항이 저감되고, 후미부 압축공기 분사를 통해 추진력 발생되어 추가 공기저항 저감 효과를 갖는다. 승객이명감과 직결되는 압력과의 측면에서 보면, 압축기가 열차 주위로 by-pass 되는 공기량을 줄여줌으로 압축과의 크기가 저감됨으로 승객이명감 감소하는 것을 기대할 수 있으며, 미기압과의 경우에

는 터널 진입 시 압축기 공기 흡입에 의해 진입 압축과 파두 구배가 완화됨으로 미기압과 저감할 수 있을 것으로 기대된다. 차량 제작성 측면에서는 단수 압축기의 적용으로 선두차량의 공간을 확보하는 것이 필요하며, 압축공기 이송관의 차간 연결이 필요하고, 단수의 압축기를 적용함으로써 에너지 소모는 상대적으로 적을 것으로 예상된다.

두 번째 설계개념(안)은 선두차 단수 압축기형으로서, 선두차량 차량 내부에 압축기를 장착하여 차량 간 이송관의 연결 없이 첫 번째 차량 끝단에서 배출하는 개념이다. 공기저항 저감 측면에서 전두부 공기 흡입에 의해 공기저항 저감되는 원리는 첫 번째 개념과 동일하며, 선두 차량 끝단에서 압축공기 분사를 통해 추진력이 발생하는 것을 기대할 수 있다. 압력파의 경우, 선두 차량에 설치된 압축기가 첫 번째 열차 주위로만 by-pass 하게 되므로 첫 번째 설계개념에 비해서는 승객이명감의 감소효과가 다소 작게 나타날 것으로, 미기압파는 첫 번째 설계개념(안)과 동일하게 터널 진입 시 압축기 공기 흡입에 의해 진입 압축과 파두 구배가 완화됨으로 미기압파가 저감되는 효과가 발생할 것으로 예측된다. 본 개념은 압축공기 이송관의 차간 연결이 필요없다는 점에서 압축공기의 이송에 소모되는 에너지를 저감하고 차량 구조가 간단하여 제작비 상승 요인이 적다는 점이 장점이다.

마지막 설계개념(안)은 압축기 외부장착형으로서, 각 차량 외부에 압축기를 장착하여 연속적으로 기류를 제어하는 방식이다. 각 차량 양측면 외부에 위치한 압축기가 압축공기 분사를 통해 추진력을 발생시켜 공기저항 저감 효과가 나타나며, 차량 양측면에 위치한 압축기가 열차 주위로 by-pass 되는 공기 유속을 증가시키므로 압축과 크기가 저감된다. 미기압파의 경우에는 터널 진입 시 각 외부 압축기로 인한 by-pass 유속 증가가 진입 압축과 파두 구배를 완화시킴으로써 미기압과 저감하는 다소 간접적인 효과를 기대할 수 있겠다. 이러한 방식은 압축기를 차량 외부에 장착하므로 기존 차량에 적용이 가능하고, 압축공기 이송관의 차간 연결이 필요 없기 때문에 구현이 용이하나, 두 번째 개념과 마찬가지로 다수 압축기 적용함으로써 에너지 소모 큰 점은 단점으로 꼽힌다.

<표 2-2-3 형태소분석을 통해 도출된 설계개념 후보>

contents	design concept 1	design concept 2	design concept 3
name of concept	열차 단수 압축기형	선두차 단수 압축기형	압축기 외부장착형
explanation	- 선두차량 내부에 압축기를 장착하여 전두부에서 흡입, 후미부에서 배출	- 선두차량 차량 내부에 압축기를 장착하여 흡입/배출량 증대	- 각 차량 외부에 압축기를 장착하여 연속적으로 기류를 제어
drawing			
aerodynamic drag	- 전두부 공기 흡입에 의해 공기저항 저감 - 후미부 압축공기 분사를 통해 추진력 발생(추가 공기저항 저감 효과)	- 전두부 공기 흡입에 의해 공기저항 저감 - 선두차량 끝단 압축공기 분사를 통해 추진력 발생(추가 공기저항 저감 효과)	- 각 차량 양측면 외부에 위치한 압축기가 압축공기 분사를 통해 추진력 발생(공기저항 저감 효과)
pressure transient	- 압축기가 열차 주위로 by-pass 되는 공기량을 줄여줌으로 압축파의 크기가 저감됨으로 승객이명감 감소	- 선두 차량에 설치된 압축기가 열차 주위로 by-pass 되는 공기량을 크게 줄여줌으로 승객이명감 다소 감소	- 차량 양측면에 위치한 압축기가 열차 주위로 by-pass 되는 공기 유속을 증가시키므로 압축파 크기 저감
micro-pressure wave	- 터널 진입 시 압축기 공기 흡입에 의해 진입 압축파 파두 구배가 완화됨으로 미기압파 저감	- 터널 진입 시 압축기 공기 흡입에 의해 진입 압축파 파두 구배가 완화됨으로 미기압파 저감	- 터널 진입 시 각 외부 압축기로 인한 by-pass 유속 증가가 진입 압축파 파두 구배를 완화시킴으로써 미기압파 저감
rolling stock design aspect	- 단수 압축기 적용으로 선두차량의 공간 필요 - 압축공기 이송관의 차간 연결이 필요 - 단수 압축기 적용함으로 에너지 소모 적음	- 차간 압축공기 이송이 불필요하므로 차량 구조 간단	- 압축기를 차량 외부에 장착하므로 기존 차량에 적용 가능 - 압축공기 이송관의 차간 연결이 필요 없음 - 다수 압축기 적용함으로 에너지 소모 큼

4. 소결

본 연구에서는 하이퍼루프 방식의 압축기를 고속열차에 적용하여 터널을 통과할 때 발생하는 공기저항, 압력 변동 및 미기압파 등 터널 공기력을 저감할 수 있는지에 대한 타당성을 살펴보기 위한 연구의 일환으로 다양한 컨셉 아이디어를 브레인스토밍 등의 기법으로 도출하고, 형태소 분석기법을 통하여 아이디어를 체계적으로 전개하여 최종적으로 3가지 타입의 하이퍼루프형 압축기 적용 고속열차 설계개념을 도출하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 다양하고 창의적인 아이디어의 도출을 위하여 기존 하이퍼루프 파생시스템의 분석 및 연구 참여자 간의 자유로운 브레인스토밍 기법을 이용하였으며, 그 결과 10개의 설계개념 아이디어를 도출하였다.
- 설계개념 아이디어의 분석 및 형태소분석기법(Morphological analysis)을 이용하여 5개 시스템 구성요소를 도출하고 각 구성요소 별 대안의 조합을 이용하여 총 72개의 설계개념 후보를 도출하였다.
- 조합 불가능 대안의 배제, 터널 공기력 저감 효과 및 차량 적용성 분석 등을 통하여 열차 단수 압축기형, 선두차 단수 압축기형 및 압축기 외부장착형 등 총 3개의 설계개념 후보를 도출하였다.

제 3 절 압축기 적용 고속열차 전용 CFD 해석 프로그램 개발

1. 개요

수치해석 기법의 발전과 전산장비의 성능 개선으로 전산유체역학 해석의 활용도가 크게 향상되었으며, 다양한 종류의 상업용/비상업용 CFD 해석 프로그램이 개발되어 연구 및 개발에 활용되고 있다. 그러나 통상적인 CFD 해석 프로그램의 경우 사용 목적에 특화되어 개발되기 때문에 장단점이 존재하며, 특히 본 연구에서 목표로 하는 압축기 적용 고속열차의 CFD 해석을 타 프로그램으로 수행하는 것은 쉽지 않다.

고속열차 CFD 해석에 필요한 특성 중 하나는 해석요소의 용이한 생성이다. 통상적인 터널-열차 통과 모형의 경우 터널, 열차, 수직갱, 후드 등의 다양한 형상이 동반되는데, 이러한 해석영역에 대해 기존의 유한체적 격자 생성 프로그램으로 직접 해석 격자계를 생성하는 데에는 적지 않은 기술과 인력이 소모된다. 그러나 고속열차 전용 CFD 해석 프로그램을 직접 개발하면, 최소한의 형상 파라미터 입력만으로 해석 요소계를 생성하는 체계를 구성할 수 있다.

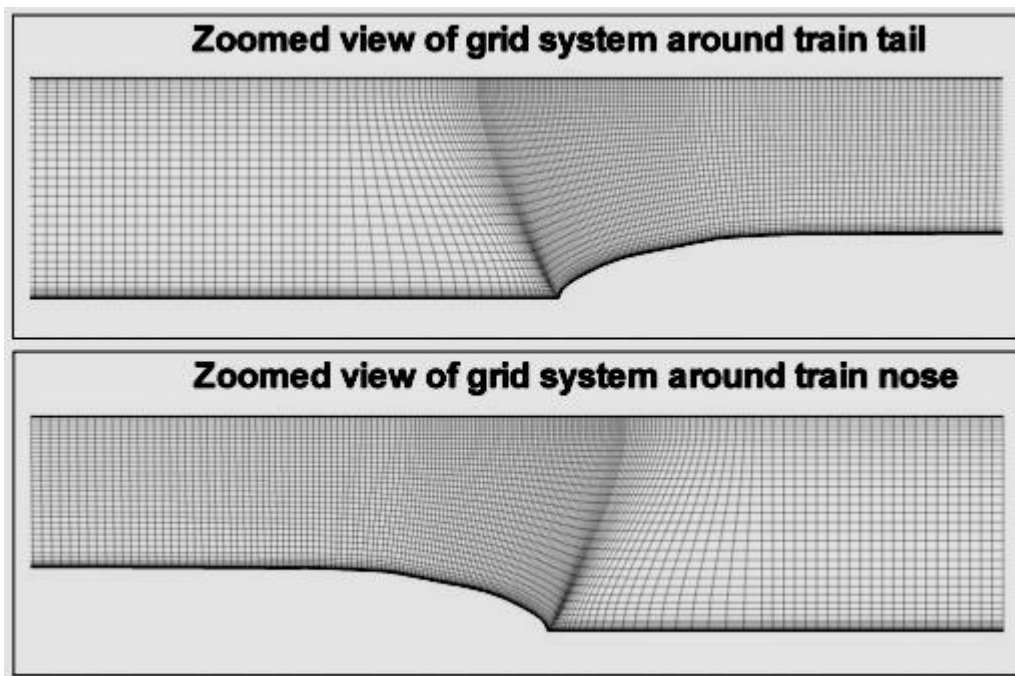
고속열차가 터널에 대해 상대운동하는 특성 또한 고려되어야 한다. 통상적인 유한체적법 해석 프로그램은 이동물체를 처리하기 위해 격자 변형, 패치드 격자 등의 기법을 사용하는데 이는 격자생성의 난이도, 해석의 안정성 및 속도에 악영향으로 작용한다. 반면 최근에는 무격자 기반의 수치해석 기법이 제시되어, 임의 형상 및 이동물체에 대해 정확성 및 강건성을 유지하면서 빠른 유동해석을 수행할 수 있는 방법으로 검토되고 있다. 무격자 기반의 수치해석 기법을 채택할 경우 형상곡선 전처리부터 유동해석 수행까지의 일련의 과정들을 별도로 개발 및 검증하여야 한다.

본 절에서는 압축기 적용 고속열차 전용 CFD 해석 프로그램을 목표로 하여, 터널-열차 모형에 대해 무격자 기반 유동해석을 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 기존의 고속열차 해석 프로그램인 C-STA를 참조하여 5종의 주요 파라미터 입력만으로 형상곡선을 구성할 수 있는 전처리 방법을 개발하였으며, 형상 곡선으로부터 무격자 해석용 질점계를 생성하는 기법을 개발하였다. 그리고 무격자 질점계 상에서 유동 지배방정식을 이산화하여 유동해석을 수행하는 기법을 개발하였으며, 이동 물체에 대한 질점 처리 및 해석 기법을 개발 및 검증하였다. 또한 압축기 적용 효과를 모사하기 위해 압축기 유입구와 토출구에서의 유동 조건을 계산할 수 있는 압축기 성능 해석 모듈을 구축하였으며, 압축기 모듈과 유동 해석 프로그램을 연동하여 압축기 적용 고속열차를 해석할 수 있는 프레임워크를 구축하였다.

2. 압축기 적용 고속열차 해석을 위한 무격자 기법 개발

가. C-STA의 형상 전처리 방법 개발

고속열차 해석을 위한 형상 전처리 및 해석용 질점계 생성 방법을 개발하기 위해 C-STA를 참조하였다. C-STA는 열차가 터널을 통과할 때의 터널 내 압력 변동을 해석하기 위해 1997년 개발되었으며, 현재에도 고속철도의 터널 진출입 등 관련 연구에 꾸준히 사용되고 있는 열차-터널 모형 전용 해석 프로그램이다. C-STA의 장점 중 하나는 터널 및 열차의 제원이나 전두부 형상 등에 대한 최소한의 수치 입력만으로 해석에 필요한 양질의 격자계를 자동으로 생성할 수 있다는 점이며, 이를 본 연구에 반영하여 프로그램 사용의 편의성을 높이고 압축기 적용 해석을 용이하게 수행할 수 있도록 하였다.



<그림 2-3-1 C-STA로부터 생성된 격자계 예시>

```

##### Input parameters for C-STAg ver 1.0 #####
<<<<<----- Primary Parameters ----->>>>>

[ Main Geometry of Train and Tunnel ]
-> Tunnel Area and Length                ; A_tu, xL_tn    ! [m2], [m]
75.9      1633.
-> Train C-area and Length              ; A_tr, xL_tr    ! [m2], [m]
10.       236.5

[ Nose Shape Generation ]
-> Length of train nose                  ; xL_nose      ! [m]
6
-> Selection of nose shape generation    ; M_Nshape, pow_N
    ( M_Nshape =1 ; power law, =2 ; input file "nose.bc")
    ( pow_N =0.0 ; parabola, =1.0 ; Cone, =2.0 ; Ellipsoid ) ! Valid at M_Nshape=1
1      2.0

[ Tail Shape Generation ]
-> Selection of tail shape generation    ; M_tail
    ( =1; Identical with nose, =2; Hemisphere)
1

```

<그림 2-3-2 C-STA 형상 입력 예시>

C-STA의 형상 입력 항목은 터널의 제원 (길이 및 단면적), 열차의 제원 (길이 및 전두부 형상), 터널 입구로부터 열차의 초기 위치 등 5종의 주요 파라미터가 최상단에 배치되어 있으며, 해석 영역의 크기와 같은 보조 파라미터는 세부사항으로 하단에 분리되어 있다. 보조 파라미터는 일반적인 문제에 적용할 수 있는 최적의 값이 미리 설정되어 있기 때문에, 실제 해석 시에는 최상단의 주요 파라미터 5종만 수정하여 필요로 하는 열차-터널 모형을 생성할 수 있다. 본 연구에서도 아래 5개 파라미터의 입력만으로 해석에 필요한 모형이 생성되어 질점계 생성 및 해석에 사용할 수 있도록 하였다.

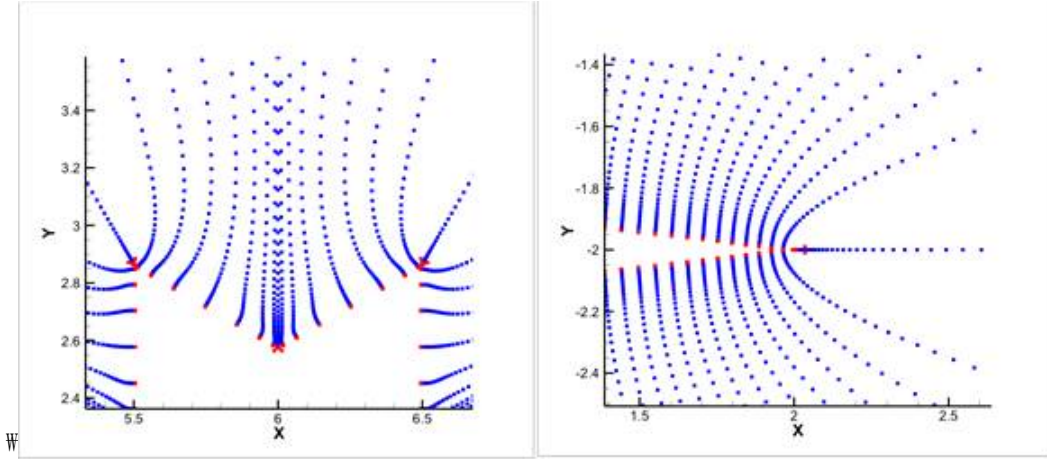
- 터널의 길이
- 터널의 단면적
- 열차의 길이
- 열차의 전두부 형상
- 터널과 열차의 초기 거리

나. 무격자 해석용 질점계 생성 기법 개발

파라미터 입력을 통해 정의된 열차-터널 모형의 형상곡선을 기반으로 무격자 유동해석용 질점계를 생성하는 기법을 개발하였다. 벽면 질점계 생성에는 전기장 선도 기법을 활용하였는데, 우선 형상곡선을 구성하는 각각의 벽면 경계점에 점전하가 위치한다고 가정한다. 이후 점전하들로부터 생성되는 전기장 선도를 따라 기하급수 간격의 벽면 경계 질점을 배치하면, 위치관계가 꼬이지 않고 직교하도록 잘 정렬되어 양질의 해석 결과를 얻을 수 있는 질점계가 생성된다.

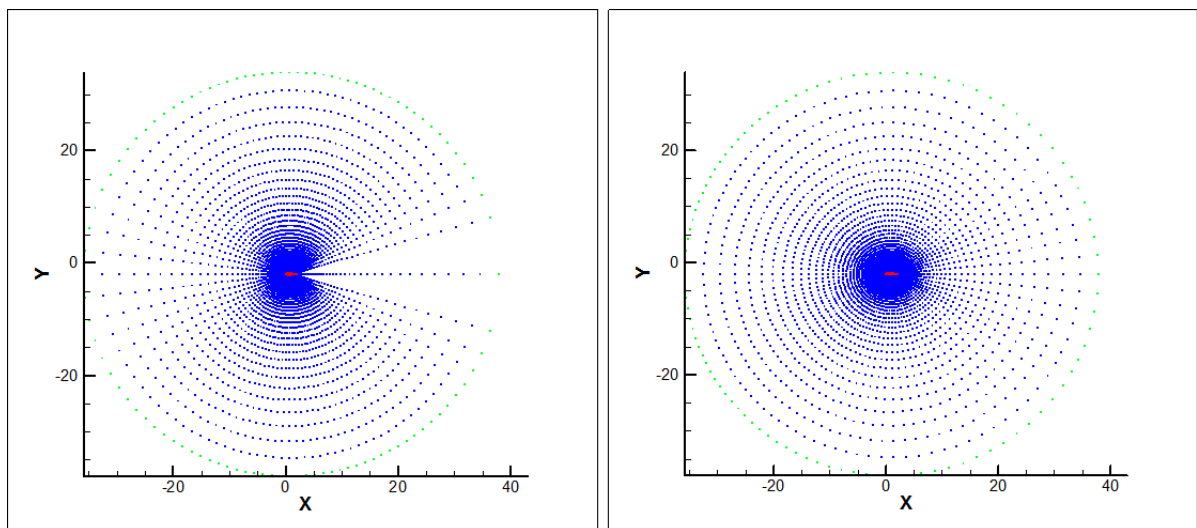
$$E_x = \sum_i \left(\frac{WF(i)}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}^3} \right) (x-x_i)$$

$$E_y = \sum_i \left(\frac{WF(i)}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}^3} \right) (y-y_i)$$



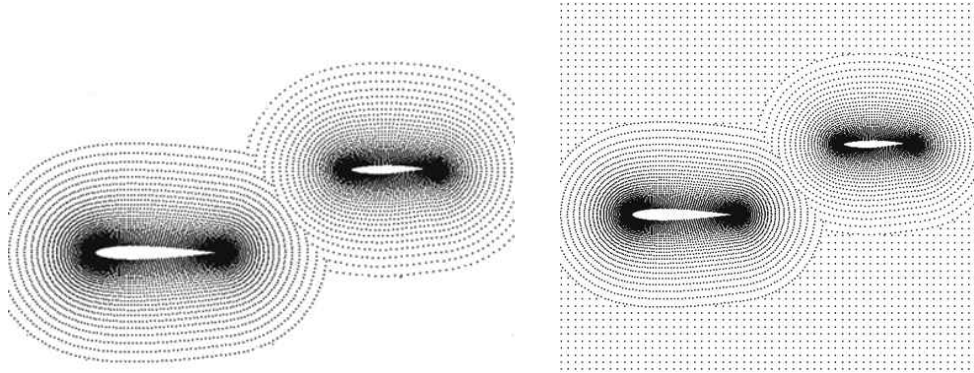
<그림 2-3-3 벽면 경계점으로부터 생성된 벽면 질점계>

그림 2-4-3의 질점계는 질점의 정렬이나 직교성 등의 측면에서 대체로 잘 생성되었지만, 형상이 날카로운 부분이나 오목한 부분에서는 질점이 고르게 분포하지 않게 되어 해석 결과의 정확도를 낮추게 된다. 이러한 부정확성을 제거하기 위해, 균일하다고 가정했던 표면 전하밀도를 곡률에 반비례하는 함수로 조정하였다. 이에 따라 형상이 날카로운 부분 등에서는 높은 곡률로 인해 낮은 전하밀도가 분포하게 되며, 결과적으로 더 많은 질점이 분포하게 되어 정확한 해석 결과를 얻을 수 있는 균일한 질점계를 생성할 수 있다.



<그림 2-3-4 전하량이 동일한 질점계 (좌), 전하량을 곡률의 함수로 설정한 질점계 (우)>

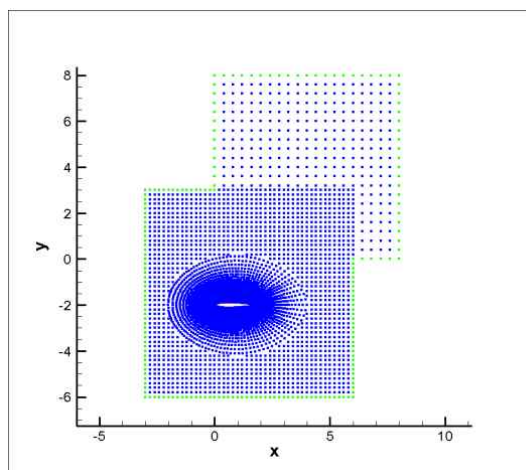
생성된 벽면 질점계를 이용하여 전체 해석영역에 대한 질점계를 생성한다. 우선 각 물체에 대한 벽면 질점계를 배치한 뒤, 영역이 중복되어 질점계가 겹치는 부분을 탐색하여 조밀한 질점을 남기고 제거한다. 이어서 나머지 해석영역을 채우는 쿼드트리 질점계를 추가하여 유동해석용 질점계를 완성한다.



<그림 2-3-5 겹침 부위 제거 및 외부 질점계 추가>

질점 배치가 완료된 후에는 무격자 유동해석을 위한 국부 질점군 구현, 연결성 부여, 원방 경계 리스트 생성 등을 수행한다. 우선 생성된 질점들을 1차원 배열로 저장한 뒤 특성에 따른 ID값을 부여하여 표면질점 및 내부질점 구분에 사용한다. 그리고 인접 질점과의 연결성을 판단하기 위해 국부 질점군을 구성하는데, 기준점에서 가장 가까운 점을 탐색한 뒤 두 점을 잇는 선분을 45도 간격으로 회전시켜 8분면을 생성하고 각 분면에서 최단점을 선택하여 8개의 질점을 국부 질점군에 추가한다.

질점계 중 가장자리의 질점은 경계조건 부여를 위해 따로 관리되어야 한다. 이를 위해 질점을 미소 변위만큼 이동시켜 질점계 범위 밖으로 벗어나는지 검사하여 판정한다. 경계 질점으로 판정된 질점들의 리스트를 저장하는 배열을 생성한 뒤 각 질점에서의 법선벡터를 저장하여 경계조건 부여 시에 참조할 수 있도록 한다.

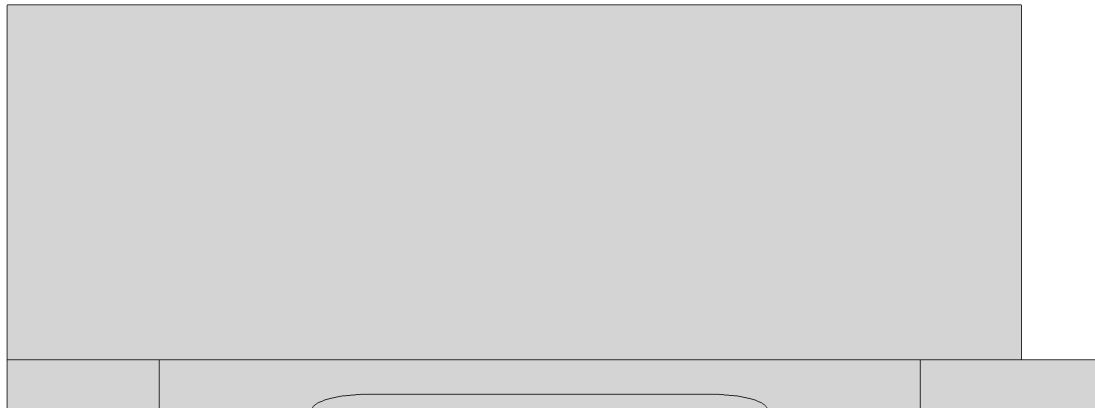


<그림 2-3-6 경계 질점으로 판정된 질점 (녹색)>

다. C-STA 입력 항목 기준으로 형상 구현

C-STA의 주요 입력 항목인 터널 길이, 터널 단면적, 열차 길이, 열차 전두부 형상, 열차의 초기 위치 등 5종의 파라미터로부터 해석 영역의 형상이 자동으로 구현되도록 하였다. 먼저 가로축 위에 열차 길이만큼의 영역을 할당한 뒤, 전두부 형상 및 이를 대칭시킨 후미부 형상을 배치 및 연결하여 열차 형상곡선을 생성한다. 이어서 열차 전두부로부터 지정된 거리에 맞게 터널 출입구 및 벽면 곡선을 생성한다.

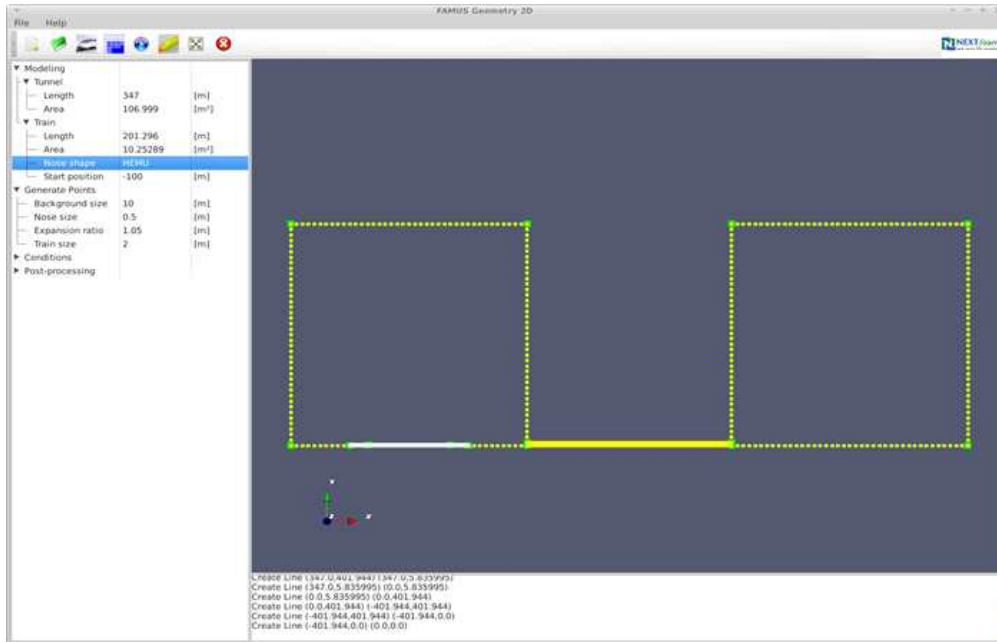
터널 출입구 양쪽에는 원방 경계조건을 부여할 수 있는 적절한 크기의 해석영역을 배치한다. 해석영역의 크기는 터널의 단면적으로부터 구한 터널의 반지름을 특성 길이로 사용하여 결정한다. 터널 입구에서는 열차 후미부로부터 특성 길이의 6배만큼 떨어진 지점을 해석 영역의 좌한으로 정하며, 터널 벽면으로부터 위 방향으로 특성 길이의 7배만큼 떨어진 지점을 해석 영역의 상한으로 정한다. 터널 출구에서는 입구에서 결정된 해석영역을 열차 길이만큼 잘라낸 크기를 사용한다.



<그림 2-3-7 자동 구현된 해석 영역 형상>

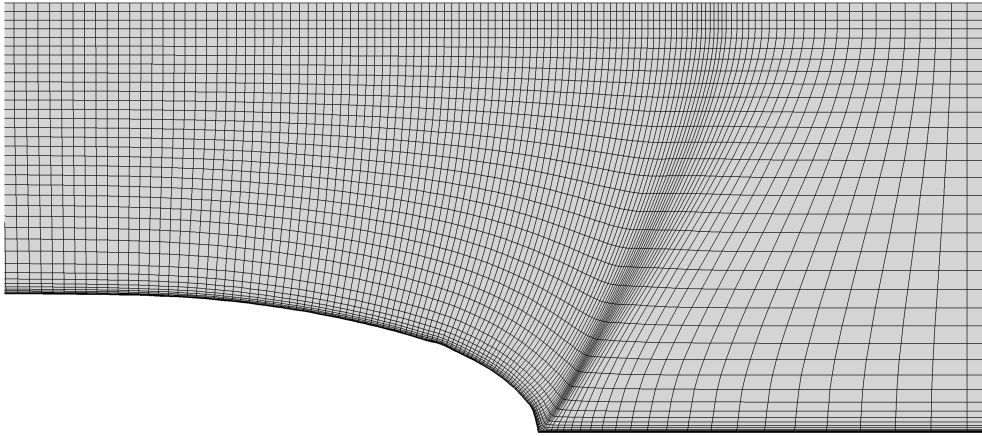
라. 형상 모델러 개발

형상 파라미터 입력으로부터 해석에 필요한 형상곡선 및 표면 점을 생성하여 그래픽으로 가시화할 수 있는 형상 모델러를 개발하였다. 형상 모델러는 전산해석 장비에서 보편적으로 채택되는 리눅스 기반 운영체제에서 실행할 수 있도록 Python 언어로 작성되었다. 그래픽 유저 인터페이스 구성을 위해 GTK 라이브러리를 사용하였으며, 형상곡선의 그래픽 출력을 위해 Visualization ToolKit (VTK) 라이브러리의 GtkGLExt VTK Render Window Interactor 위젯을 사용하였다.

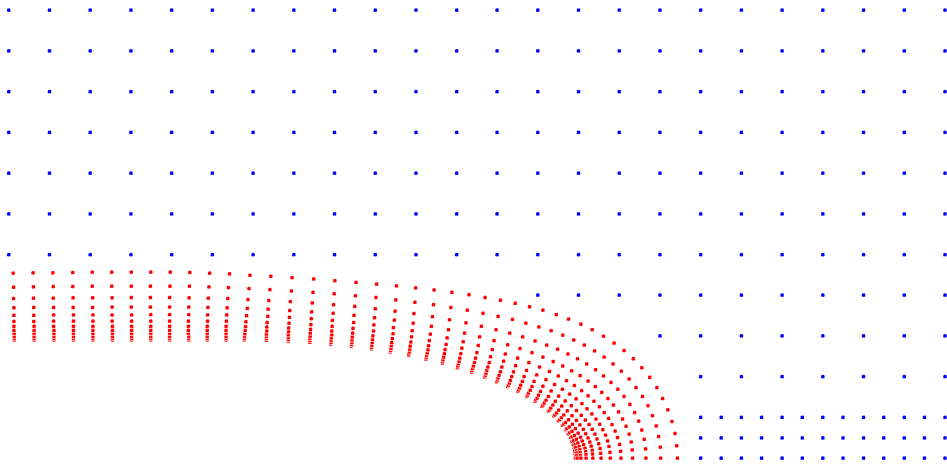


<그림 2-3-8 개발된 형상 모델러>

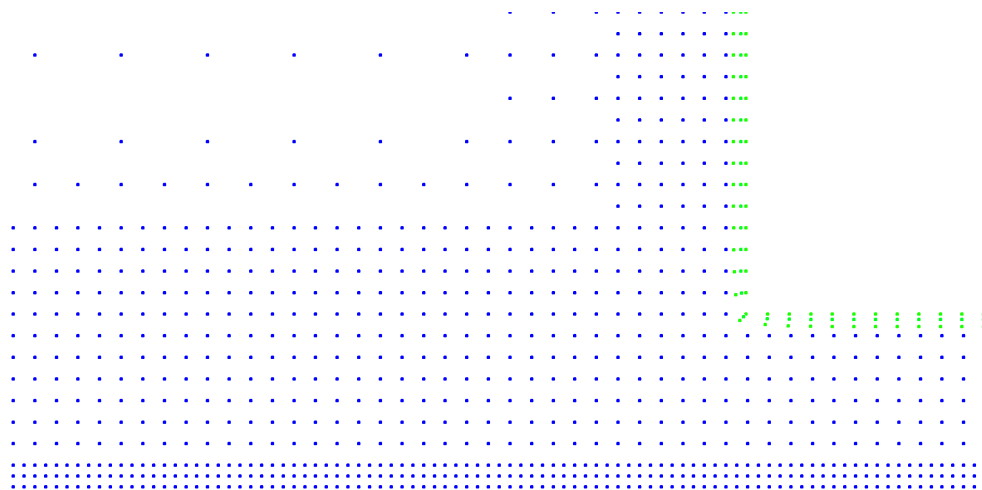
모델러의 인터페이스 구성은 그림 8과 같다. 좌측의 트리 메뉴에서 해석영역 구성에 필요한 5종의 주요 파라미터를 입력할 수 있으며, 파라미터 입력 후 상단의 생성 버튼을 클릭하면 우측의 그래픽 화면에 열차-터널 모형의 형상곡선이 출력된다. 형상곡선을 검토한 뒤 문제가 없으면 무격자 유동해석용 질점 생성 프로그램과 연동하여 해석용 질점계를 생성할 수 있다. 생성된 열차-터널 모형 질점계를 다음과 같이 같이 C-STA 생성 격자계와 비교하였다. 열차 표면에서의 점성 난류 유동을 포착하기 위해 조밀하게 생성된 표면 질점, 터널 내부 유동장 및 압력파를 포착하기 위한 쿼드트리 질점계가 잘 생성됨을 확인할 수 있다.



<그림 2-3-9 C-STA 생성 격자계>



<그림 2-3-10 열차 무격자 질점>



<그림 2-3-11 터널 무격자 질점>

3. 압축기 모델링 기법 및 경계 조건 개발

가. 압축기 1-D 성능 해석 기법 개발

압축기의 유량계수는 압축기 성능지표 중 체적유량과 관련된 무차원화 성능계수로, 설계된 로터에 대하여 형상의 크기만 변경되어 상사성이 유지되면 압축기 입구조건과 운전상태에 관계없이 일정한 값을 가지게 되어 해당 로터의 고유 공력특성을 나타낼 수 있다. 이러한 압축기 유량계수는 압축기의 입구유량, 로터의 회전 끝단속도 및 회전단면적을 이용하여 다음과 같은 수식으로 정의할 수 있다.

$$\phi = \frac{\dot{m}}{\pi/4 \cdot \rho_1 U_2 D_2^2} = \frac{Q}{\pi/4 \cdot U_2 D_2^2}$$

위의 식에서 $\dot{m}$ 은 압축기에 유입되는 입구 질량유량(kg/s), ρ_1 은 입구밀도(kg/m³), U_2 는 압축기 회전에 의한 로터 끝단에서의 속도, D_2 는 로터 직경(m)을 의미하며, Q 는 체적유량(m³/s)이다.

이와 같은 유량계수는 압축기 로터 성능을 나타내는 주요 인자 중 하나로, 무차원화 성능계수인 유량계수에 따른 압축기 성능은 실제 회전수 및 압축기 운용 마하수에 독립적인 인자로 확인된다. 즉 동일한 로터를 적용하는 경우, 축류압축기의 실제 회전속도 및 입구조건 등에 따라 유량 및 토출압력 등의 성능 관련 인자들은 매번 바뀌지만, 유량계수는 거의 동일한 값을 갖게 된다. 그러므로 하나의 압축기를 개발한 뒤, 다른 운전조건에 대하여 기존에 개발된 압축기를 활용하는 경우, 로터 공력성능을 질량유량이나 체적유량 및 그에 따른 토출압력 등의 실제 데이터 값을 이용하여 분석하는 것보다는 무차원화변수인 유량계수에 회전속도, 입구밀도, 로터의 직경 등의 변경된 조건의 실제 값들을 적용하면 해당 조건에서의 체적유량 또는 질량유량을 바로 예측할 수 있어 압축기 성능을 예측하기 용이하다.

압축기의 양정계수는 압축기 각 단에서의 로터 회전에 따른 엔탈피 상승과 관련된 무차원화 성능계수이며, 다음 식과 같이 엔탈피 증가량과 로터 끝단속도를 이용하여 정의한다.

$$\psi = \frac{\Delta h}{U_2^2}$$

위 식에서 Δh 는 각 단에서 로터의 회전운동에 의하여 얻은 엔탈피 증가량으로 아래의 식과 같이 각 단의 압력비와 입구온도, 기체상수, 비열비 등을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\Delta h = Z_1 R T_1 \frac{k}{k-1} \left[r_p^{(k-1)/k} - 1 \right]$$

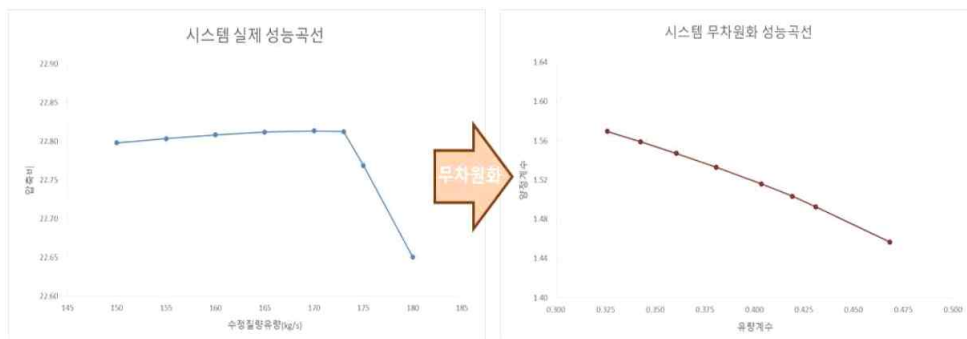
위 식에서 Z_1 은 압축기 각 단 입구에서의 압축성 계수, R 은 기체 상수, T_1 은 입구온도, k 는 비열비, 그리고 r_p 는 해당 단에서의 압축비를 의미한다. 일반적으로 Z_1 값은 음속을 초과하지 않으면 거의 1에 수렴하므로 1로 가정하고, 비열비 k 는 수증기의 함유량 등에 의하여 영향을 받으나, 진공 튜브 내의 극저압 상태에서의 공기는 수증기를 포함하지 않고 있는 건조공기로 가정하여 1.4를 적용하여 엔탈피 증가량을 계산하고 이를 이용하여 압축기 양정계수를 도출하도록 한다.

압축기의 양정계수는 해당 로터의 압축능력에 관한 고유 특성을 나타내는 지표로 설계가 완료된 경우 압축기 운전 조건에 상관없이 해당 단의 양정계수는 일정하여 로터의 회전속도가 느리면 해당 단에서의 엔탈피 증가량이 감소하며, 반대로 회전속도가 빠르면 엔탈피 증가량도 커지게 된다. 이러한 특성을 지닌 압축기 양정계수를 앞서 설명한 유량계수와 함께 활용하면 기존에 설계된 로터 등의 공력부를 다양한 운전 조건에 적용했을 때 각각의 유량계수와 양정계수로부터 압축기의 체적유량 및 엔탈피 증가량을 계산하여 질량유량, 토출압력 등의 실제 압축기 성능지표들을 예측할 수 있다.

일반적으로 압축기의 성능을 나타내는 지표로는 실제 유량 대비 토출압력 (또는 압축비), 유량 대비 효율 곡선을 활용한다. 설계된 압축기를 정해진 조건에서만 운전하는 경우에는 입출구조건 및 운용조건이 고정되어 있으므로 실제 질량유량 대비 토출압력(압축비) 및 효율 곡선을 활용하면 각 단의 토출압력과 해당 단에서의 효율 값을 쉽게 예측할 수 있어 편리하다. 그러나 터널 내부를 주행하는 고속열차 차량의 경우 정상운전 상태에서의 속도는 마하 0.3 정도로 일정하나 압력과 발생 및 교행 등에 의하여 실제로는 다양한 입구 조건에서 운전하게 되면 동일한 압축기를 사용하더라도 질량유량, 토출압력, 소요 축파워 등의 실제 성능 지표들이 달라진다. 이러한 경우 설계된 압축기의 무차원화 성능계수를 이용하면 로터 등 공력부의 성능 특성을 고유값으로 고정할 수 있어 변경된 운전조건을 적용한 압축기의 성능을 조건별로 예측할 수 있다. 그러므로 CFD 해석의 경계조건으로 적용하기 위하여 고속열차 차량의 다양한 운전 조건에 대한 압축기의 성능을 예측하기 위해서는 먼저 기존 압축기의 설계 및 시험 결과를 유량계수, 양정계수와 같은 무차원화 성능계수로 전환해야 한다.

실제 압축기의 정확한 성능해석을 위해서는 각 단의 공력설계에 관한 상세설계 단계가 종료된 이후 3차원 형상을 활용하여 각 단의 성능곡선을 시스템 상에서 운영되는 구간 뿐만 아니라, 실제 해당 로터가 운영될 수 있는 전체 영역을 포함하도록 도출하고, 이를 활용하여 압축기 성능해석을 수행하는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에서는 터널 내 고속열차 차량의 주행 과정에서 예상되는 공기력 현상을 해소 또는 완화하기 위하여 고속열차 차량에 장착하기 위한 압축기의 개념설계를 수행하고, 압축기 운전 시 실제 유동 개선효과가 있는지를 확인하기 위하여 수행하는 CFD 해석의 경계조건으로써 압축기 입출구조건을 제공하는 것이 목적이다. 이와 같은 목적을 위해서는 각 단의 로터

및 스테이터의 상세설계 단계까지 진행하는 것보다는 간단한 1D 해석을 위한 개념설계 단계까지 수행하고, 압축기의 운용조건 범위 내에서 시스템의 성능해석을 수행하여 압축기 입출구조건을 도출하는 것이 효과적이다. 그리고 다단압축기의 경우 단과 단 사이가 매우 근접해 있어 직전 단에서 토출된 유동이 다음 단으로 바로 유입되며, 그 사이에 압력저하 요인은 크지 않으므로 직전 단의 토출압력을 다음 단의 입구압력으로 가정할 수 있다. 이러한 내용들을 종합하여 압축기 운용 범위 내의 질량유량 범위에 대하여 도출한 각 단 무차원화 성능곡선을 활용하여 전체 시스템 무차원화 성능곡선을 도출할 수 있고, 이를 이용하여 열차 전두부의 압축기 유입구 근방 압력과 온도 및 유속을 입력하면 압축기 입구 질량유량과 토출압력, 온도를 제공할 수 있도록 압축기 모듈을 구축하였다.



<그림 2-3-12 압축기 성능곡선 예시>

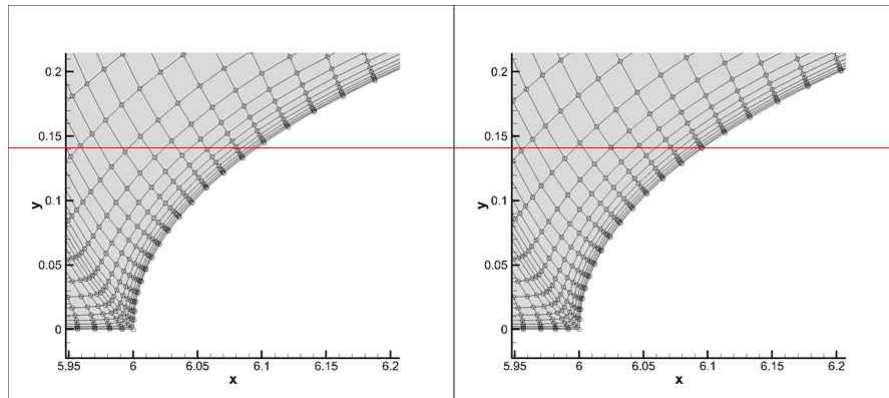
압축기 설계안에 대한 성능곡선이 획득되면 압축기 유입구에서의 유동값을 성능곡선에 대입하여 토출구에서의 유동조건과 압축기 효율을 계산할 수 있다. 먼저 유입구에서의 밀도, 속도, 면적을 이용하여 질량유량을 구한 뒤, 성능곡선에서 질량유량에 해당하는 압축비를 추출한다. 추출된 압축비를 이용하여 등엔트로피 과정에 따른 유동값 변화를 계산한 뒤, 토출구에서의 밀도, 면적과 질량유량을 만족하는 속도를 구하여 이를 토출구 경계조건 부여에 사용할 수 있다.

$$\dot{m} = \int \rho_1 v_1 dA, \text{ PR} = f(\dot{m}), \rho_2 = \rho_1 \text{PR}^{\frac{1}{\gamma}}, p_2 = p_1 \text{PR}, T_2 = T_1 \text{PR}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, v_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 dA}$$

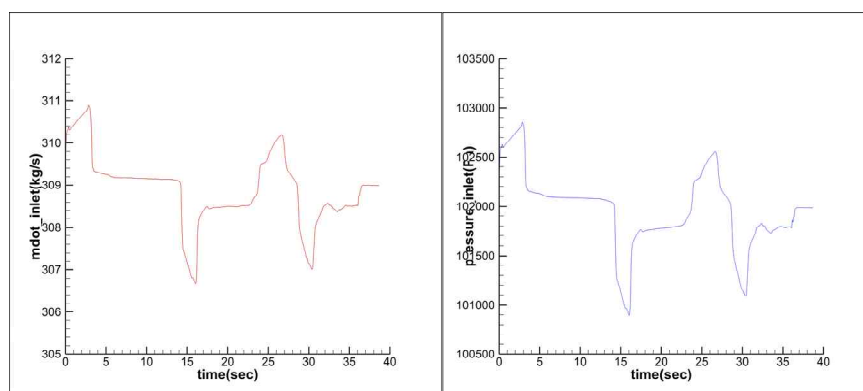
나. 압축기 경계조건 계산을 위한 프레임워크 구축

압축기 유입구에서의 유동 조건 변동을 추적하기 위해 열차 전두부의 표면질점 일부분을 유입구 질점으로 지정하여 유동값 평균치를 별도로 저장하도록 하였다. 특정한 유입구 면적의 경계선이 되는 질점을 정확히 위치시키기 위해 형상곡선 상에서의 질점 클

러스터링 인자를 시행착오법으로 결정하였다. 유입구에서의 유동값은 밀도, 압력, 속도, 온도와 더불어 질량유량을 전역변수 및 파일로 저장하여 토출구 경계조건에 참조하거나 사용자가 확인할 수 있도록 하였다.

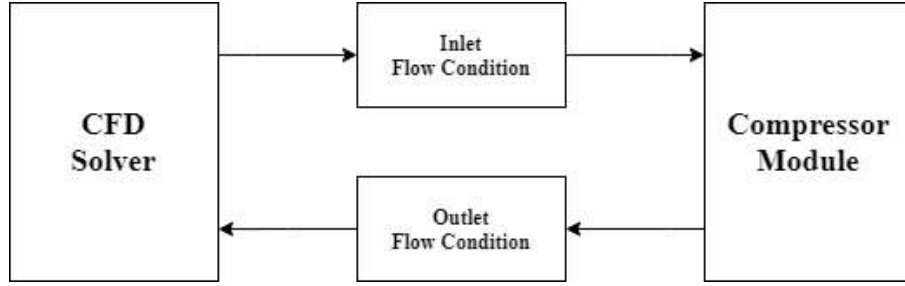


<그림 2-3-13 압축기 면적 구분을 위한 표면질점 조정>



<그림 2-3-14 압축기 유입구에서의 유동값 추적 예시>

유입구에서 획득한 유동값으로부터 토출구 유동값을 출력하는 압축기 모듈을 구축하였다. 해당 모듈에 유입구 질량유량, 밀도, 압력, 온도, 속도를 입력하면 (가)절에 설명된 성능곡선 대입 및 등엔트로피 과정 계산을 거쳐 토출구에서의 밀도, 압력, 온도, 속도를 리턴한다. 해석 프로그램에서는 이 결과값을 토출구면 질점의 경계조건 부여에 사용한다.



<그림 2-3-15 압축기 경계조건 계산 프레임워크 모식도>

다. 고속열차 주위 유동 해석용 경계조건 개발

1) 원방 경계 조건

통상적인 열차-터널 모형 해석에서는 압력과 등의 압축성 유동현상이 발생하는데, 이것을 원방 경계에서 적절히 처리하지 않으면 압력파가 반사되는 수치적 오류로 인해 해석 결과의 정확성이 떨어질 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 무반사 조건인 리만 불변량 경계조건을 원방경계에 적용하였다. 리만 불변량 경계조건은 유입류와 유출류, 아음속 및 초음속 유동을 자가 판단하여 경계조건을 차등적으로 부여한다. 본 연구에서는 초음속 유동현상이 발생하지 않으므로 아음속 유동에 대한 리만 불변량만 고려한다.

아음속 유입류의 리만 불변량은 다음과 같다.

$$R^+ = \overrightarrow{V_{nB}} + \frac{2c_B}{\gamma-1} = \left| \overrightarrow{V_{n\infty}} \right| + \frac{2c_\infty}{\gamma-1}, \quad R^- = \overrightarrow{V_{nB}} - \frac{2c_B}{\gamma-1} = \left| \overrightarrow{V_{ni}} \right| - \frac{2c_\infty}{\gamma-1}$$

아음속 유출류의 리만 불변량은 다음과 같다.

$$R^+ = \overrightarrow{V_{nB}} + \frac{2c_B}{\gamma-1} = -\left| \overrightarrow{V_{n\infty}} \right| + \frac{2c_\infty}{\gamma-1}, \quad R^- = \overrightarrow{V_{nB}} - \frac{2c_B}{\gamma-1} = -\left| \overrightarrow{V_{ni}} \right| - \frac{2c_\infty}{\gamma-1}$$

이를 이용하여 원방 경계에서의 유입류 물성치를 계산하면 다음과 같다.

$$\left| \overrightarrow{V_{nB}} \right| = \frac{R^+ + R^-}{2} \quad V_{tB} = V_{t\infty} \quad c_B = \frac{\gamma-1}{4}(R^+ - R^-) \quad s_B = s_\infty$$

마찬가지로 유출류의 물성치는 다음과 같다.

$$\left| \overrightarrow{V_{nB}} \right| = -\frac{R^+ + R^-}{2} \quad V_{tB} = V_{ti} \quad c_B = \frac{\gamma-1}{4}(R^+ - R^-) \quad s_B = s_i$$

계산된 불변량으로부터 경계면에서의 유동 조건을 획득하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{c^{(\frac{1}{\gamma-1})}}{s_B \gamma} \\ \rho u &= \rho \frac{V_{tB} \eta_y + V_{nB} \eta_x}{\sqrt{\eta_y^2 + \eta_x^2}} \\ \rho v &= \rho \frac{-V_{tB} \eta_x + V_{nB} \eta_y}{\sqrt{\eta_y^2 + \eta_x^2}} \\ \rho e_t &= \rho \left(\frac{c_B}{\gamma(\gamma-1)} + \frac{u^2 + v^2}{2} \right) \\ p &= p_b\end{aligned}$$

2) 벽면 경계 조건

점성 유동 현상을 해석하기 위해 점착 경계 조건을 벽면에 부여하였다. 밀도와 압력은 벽면 바로 바깥 점에서 외삽하여 벽면에서의 기울기가 0이 되도록 하고, 속도 벡터는 점대칭하여 벽면에서의 속도 크기가 0이 되도록 하였다.

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_b \\ \rho u &= -\rho_b u_b \\ \rho v &= -\rho_b v_b \\ \rho e_t &= \frac{p}{\gamma-1} + \rho \frac{u^2 + v^2}{2} \\ p &= p_b\end{aligned}$$

3) 압축기 경계 조건

유입구에서는 압축기의 설계안 및 유량계수에 따라 흡입 체적유량이 일정하게 된다. 본 연구에서는 압축기 유입구 면적 또한 일정하므로 질량유량을 유입구 면적으로 나누어 유입구에서의 평균 속도를 결정할 수 있다. 나머지 유동값인 밀도와 압력은 경계면 바로 바깥 점에서 외삽하여 연속성을 만족하도록 하였다.

$$\begin{aligned}
\rho &= \rho_b \\
\rho u &= \rho_b \frac{\dot{V}_{comp}}{\int dA} \\
\rho v &= 0 \\
\rho e_t &= \frac{p}{\gamma - 1} + \rho \frac{u^2 + v^2}{2} \\
p &= p_b
\end{aligned}$$

토출구에서는 유입구에서 결정된 질량유량이 지체 없이 즉시 빠져나간다고 가정하여, 특정 질량유량이 해석영역 내부로 유입되는 질량 유입 경계조건을 적용하였다. 추가 구속 조건으로는 압축기 작동에 따른 전온도 상승을 가정하여, 특정 전온도와 해당 질량유량을 주변 밀도장에서 만족하는 속도와 압력값을 찾는다.

토출구에서 온도, 속도, 전온도의 관계식은 다음과 같다.

$$c_p T + \frac{\overline{U}^2}{2} = c_p T_0$$

한편 토출구에서의 평균 속도 및 평균 밀도의 정의, 이상기체의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\overline{U} = \frac{\dot{m}}{\overline{\rho} A}, \quad \overline{\rho} = \frac{\int_{\text{boundary}} \rho dA}{A}, \quad \overline{p} = \frac{\overline{p}}{RT}$$

위 식을 전온도 관계식에 대입하면 온도에 대한 이차방정식을 얻는다.

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\dot{m} R}{\overline{p} A} \right)^2 T^2 + c_p T - c_p T_0 = 0$$

위 이차방정식의 근 중 T 가 양수인 근을 선택하여 경계면에서의 정온도로 부여하고, 해당 온도와 질량유량을 만족하는 속도를 계산한다.

$$T_b = \max(T_1, T_2), \quad U = \frac{T_b}{\gamma} \frac{\dot{m}_{ramp}}{\overline{p} A}$$

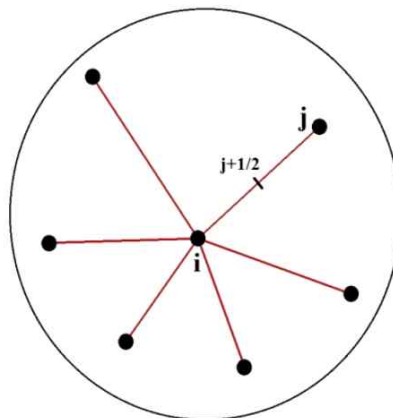
위의 U , T_b 를 참조하여 최종적으로 결정되는 토출구 유동 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_b \\ \rho u &= \rho U \\ \rho v &= 0 \\ \rho e_t &= \frac{p}{\gamma-1} + \rho \frac{u^2 + v^2}{2} \\ p &= \frac{\rho_i T_b}{\gamma}\end{aligned}$$

4. 격자 연결정보를 사용하는 기존 세대 유동해석과 달리 질점만 이용한 해석기법 개발 및 활용

가. 최소 제곱법 (Least Square Method)

열차-터널 모형에서 유동현상의 지배방정식인 2차원 축대칭 나비에스톡스 방정식은 미분항이 포함된 미분방정식이므로, 수치해석 장비에서 대수적으로 계산하기 위해서는 각 항을 이산화하여야 한다. 기존의 격자 기반 유동해석 프로그램에서는 정형화된 격자 배치 및 연결성이 존재하여 비교적 쉽게 미분값을 이산화할 수 있으나, 격자정보 없이 임의로 분포하는 질점계에서는 미분값 계산을 위한 격자 정보가 존재하지 않는다. 그러므로 임의로 배치된 질점 및 물리량으로부터 국부 질점군을 구성하여 미분값을 예측할 수 있는 최소 제곱법을 사용하였다.



<그림 2-3-16 국부 질점군>

기준 질점 (아래첨자 0)에서의 테일러 전개를 통해 이웃 질점 (아래첨자 j)에서의 값

을 계산하면 다음과 같다.

$$\Delta\phi_{0j} = \Delta x_{0j} \frac{\partial\phi_0}{\partial x} + \Delta y_{0j} \frac{\partial\phi_0}{\partial y} + O(\Delta^2)$$

여기 2차 이상의 항을 무시하고, 모든 이웃 질점에서의 절단 오차에 대해 최소 자승법 식을 세우면 다음과 같다.

$$\text{minimize } \sum_{j=1}^n w_{0j} [\Delta\phi_{0j} - \Delta x_{0j} \frac{\partial\phi_0}{\partial x} - \Delta y_{0j} \frac{\partial\phi_0}{\partial y}]^2, \quad \text{wrt } \frac{\partial\phi_0}{\partial x}, \frac{\partial\phi_0}{\partial y}$$

여기서 w_{0j} 는 가중 함수로, 거리가 가까운 질점을 먼 질점보다 많이 반영하기 위한 계수이며 본 연구에서는 다음과 같이 거리의 역수를 가중 함수로 사용하였다.

$$w_{0j} = \frac{1}{(\Delta x_{0j}^2 + \Delta y_{0j}^2)^{1/2}}$$

위의 최소 자승법 식을 $\partial\phi_0/\partial x$, $\partial\phi_0/\partial y$ 에 대한 다변수 함수로 보고 각각에 대해 편미분하여 선형 연립방정식을 풀면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial\phi_0}{\partial x} &\approx \sum_{j=1}^n a_{0j} \Delta\phi_{0j}, \quad a_{0j} = \frac{w_{0j} \Delta x_{0j} \sum w \Delta y^2 - w_{0j} \Delta y_{0j} \sum w \Delta x \Delta y}{\sum w \Delta x^2 \sum w \Delta y^2 - (\sum w \Delta x \Delta y)^2} \\ \frac{\partial\phi_0}{\partial y} &\approx \sum_{j=1}^n b_{0j} \Delta\phi_{0j}, \quad b_{0j} = \frac{w_{0j} \Delta y_{0j} \sum w \Delta x^2 - w_{0j} \Delta x_{0j} \sum w \Delta x \Delta y}{\sum w \Delta x^2 \sum w \Delta y^2 - (\sum w \Delta x \Delta y)^2} \end{aligned}$$

위의 무격자 차분 기법은 가장 기본적인 형태로써 실제로 해석 결과를 얻는 데에 사용할 수도 있지만, 해석영역에서의 보존성을 만족하지 않는다는 문제점이 있다. 기존의 유한체적법에서는 보존성이 자연스럽게 만족되지만, 무격자 기법으로 구한 미분계수에서는 보존성을 만족하도록 하는 장치가 없기 때문이다. 보존성을 위해 무격자 계수가 만족해야 하는 구속조건은 다음과 같다.

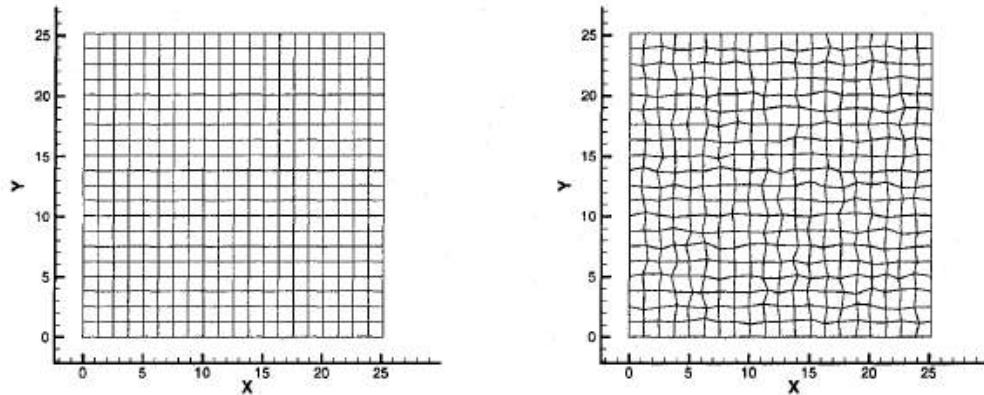
$$\begin{aligned} \sum_j^n a_{ij} &= 0, \quad \sum_j^n b_{ij} = 0 \\ a_{ij} &= -a_{ji}, \quad b_{ij} = -b_{ji} \end{aligned}$$

첫 번째 식은 Geometric Conservation Law이며, 질점 i 와 연결된 이웃 질점 j 들이 마치 다면체 격자처럼 해석영역 상에 빈 공간이 없는 닫힌 경계면을 구성하여 질점 i 에

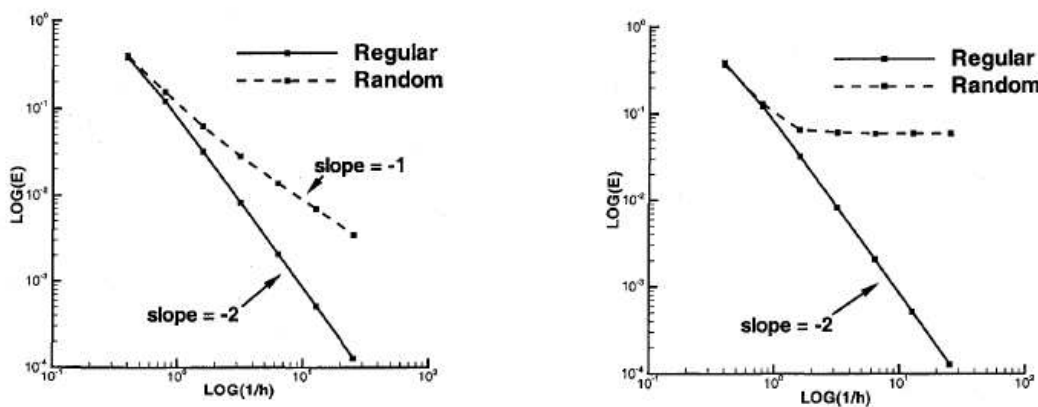
출입하는 flux와 질점 i 에서의 물리량의 보존성을 확보한다. 두 번째 식은 Flux Conservation Law이며, 질점 i 에서 j 방향으로 전달되는 flux를 계산한 것이 반대 질점에서도 동일하게 계산되도록 한다. 그런데 이 식은 해석영역 내의 모든 질점 및 무격자계수가 동시에 연결되어 만족해야 하므로, 수십만 개 이상의 무격자계수에 대한 연립 방정식을 대수적으로 취급해야 하는 어려움이 있다. 그러므로 Huh 등은 라그랑주 곱수법을 도입해 Geometric Conservation Law만을 유지하며 국부적인 보존성을 만족하는 무격자계수를 구하는 방법을 제시하였으며, 본 연구에서도 같은 기법을 사용하였다.

최소 제공법의 예러 특성이 선행 연구에서 조사되었다. A. Katz는 다음과 같이 근사 함수를 임의로 설정한 뒤 균일 격자계와 랜덤 격자계에서 각각 유한체적법과 최소 제공법의 오차 수렴 특성을 조사하였다.

$$f(x,y) = \sin x \sin y, \quad \frac{\partial f}{\partial x} = \cos x \sin y, \quad \frac{\partial f}{\partial y} = \sin x \cos y$$



<그림 2-3-17 최소제공법 정확도 평가를 위한 두 가지 격자계>
좌 : 균일 격자계, 우 : 랜덤 격자계



<그림 2-3-18 수치해석 방법에 따른 오차 수렴 특성>
좌 : 최소제공법, 우 : 유한체적법

유한체적법은 균일 격자계에서만 좋은 수렴 특성을 보이는 반면 랜덤 격자계에서는 일정 수준 이상으로 수렴하지 못하였다. 이에 반해 최소제곱법의 경우 랜덤 격자계에서도 수렴 속도는 비교적 느리지만 유한체적법에 비해 더 낮은 오차까지 수렴할 수 있음을 확인하였다. 그러므로 본 연구와 같이 임의의 격자 생성 및 유동 해석을 수행하는 무격자 기반 해석 프로그램의 기반 알고리즘으로 적절함을 검증하였다.

나. 대류항 플럭스 계산 기법

축대칭 모델에서의 수치해석을 위한 원통좌표계 상에서의 압축성 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{G}}{\partial y} + \vec{H} &= \frac{\partial \vec{F}_v}{\partial x} + \frac{\partial \vec{G}_v}{\partial y} + \vec{H}_v \\ \vec{Q} &= \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e_t \end{bmatrix}, \vec{F} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (\rho e_t + p)u \end{bmatrix}, \vec{G} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (\rho e_t + p)v \end{bmatrix}, \vec{H} = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (\rho e_t + p)v \end{bmatrix} \\ \vec{F}_v &= \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} - q_x \end{bmatrix}, \vec{G}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ u\tau_{yx} + v\tau_{yy} - q_y \end{bmatrix}, \vec{H}_v = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} 0 \\ h_{v2} \\ h_{v3} \\ h_{v4} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

여기서 $\vec{Q}$ 는 보존 변수 벡터, $\vec{F}$ 와 $\vec{G}$ 는 대류항 플럭스 벡터, $\vec{H}$ 는 축대칭 소스항, $\vec{F}_v$ 와 $\vec{G}_v$ 는 점성 플럭스 벡터, $\vec{H}_v$ 는 축대칭 점성 소스항을 나타낸다. 점성 플럭스 벡터의 각 항의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= -\frac{2}{3}\mu S_{kk}\delta_{ij} + 2\mu S_{ij}, S_{ij} = \frac{1}{2}\left\{\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right\}, \mu = \mu_l + \mu_t, \\ q_i &= \kappa \frac{\partial T}{\partial x_i}, \kappa = \kappa_l + \kappa_t, \kappa_l = \mu_l \frac{c_p}{Pr_l}, \kappa_t = \mu_t \frac{c_p}{Pr_t} \end{aligned}$$

여기서 u_i 는 속도벡터의 i 방향 성분, τ_{ij} 는 점성 응력 텐서, q_i 는 열전도를 나타낸다. 점성계수 μ 와 열전도계수 κ 에서 아래첨자 l 과 t 는 각각 층류, 난류 계수이며, c_p 는 공기의 정압비열, Pr 은 Prandtl number이다. 위 식과 더불어 이상기체의 상태방정식과 총에너지의 정의를 추가하면 지배방정식이 완성된다.

$$p = \rho RT, \quad e_t = \frac{p}{\rho(\gamma-1)} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$$

무격자 기법을 이용하여 지배방정식을 이산화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_0}{\partial t} + \sum_{j=1}^n (a_{0j} \Delta f_{0j} + b_{0j} \Delta g_{0j}) + H_0 \\ = \sum_{j=1}^n (a_{0j} \Delta f_{v0j} + b_{0j} \Delta g_{v0j}) + H_{v0} \end{aligned}$$

여기서 아래첨자 j 는 기준 질점 (아래첨자 0) 주변 국부 질점군에서의 번호이고, a_{0j} , b_{0j} 계수 값은 위의 무격자계수 식에서 계산된다. 위의 이산화 지배방정식을 directed flux $F = af + bg$ 로 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q_0}{\partial t} + \sum_{j=1}^n \Delta F_{0j} + H_0 = \sum_{j=1}^n \Delta F_{v0j} + H_{v0}$$

유한 차분으로 인한 오차를 줄이기 위해 질점 사이의 중간값을 이용해 좌변의 2개 항을 변형하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_0}{\partial t} + \sum_{j=1}^n \Delta F_{0j} &= \frac{\partial Q_0}{\partial t} + 2 \sum_{j=1}^n \Delta F_{0j+\frac{1}{2}} \\ &= \frac{\partial Q_0}{\partial t} + 2 \sum_{j=1}^n (F_{0j+\frac{1}{2}} - F_{0j}) \end{aligned}$$

위 식의 $F_{0j+1/2}$ 는 수치적 불안정성을 제어할 수 있는 Roe 또는 AUSMPW+기법으로 계산하여, 압력과 주변에서의 수치 불안정성을 해결하는 동시에 고속 압축성 유동 해석에서의 정확성과 계산 효율성을 확보하였다. 또한, Monotonic Upwind Scheme for Conservation Laws (MUSCL) 기법을 적용하여 공간에 대한 3차 정확도를 획득하였다. 내재항에 대해서는 Van Leer의 Flux Vector Splitting 기법을 적용하였다. 점성 응력 텐서의 계산에 사용되는 속도장의 기울기 성분 또한 무격자 기법으로 계산된 미분계수를 대입하였다.

다. 시간 수치 해석 기법

시간 전진 기법으로는 빠른 수렴과 높은 정확성을 얻기 위해 시간에 대한 2차 후방 차분을 사용하는 dual-time stepping 기법을 적용하였으며, pseudo 시간 적분 시에는 비정렬 질점계에서도 사용이 가능하며 높은 수렴과 효율성을 보이는 Lower-Upper Symmetric-Gauss-Seidel (LU-SGS) 기법을 사용하였다.

지배방정식을 내재적 방법으로 이산화하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta w_i}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial x}(A_i \Delta w_i) + \frac{\partial}{\partial y}(B_i \Delta w_i) = RHS$$

$$RHS = -\frac{\partial}{\partial x}(E_i^n) - \frac{\partial}{\partial y}(F_i^n), \quad A_i = \frac{\partial E}{\partial w} \Big|_i, \quad B_i = \frac{\partial F}{\partial w} \Big|_i$$

여기에 최소제곱법을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta w_i}{\Delta t} + \sum_j a_{ij}(A_j \Delta w_j - A_i \Delta w_i) + \sum_j b_{ij}(B_j \Delta w_j - B_i \Delta w_i) = RHS$$

$$\left(\frac{1}{\Delta t} - \sum_j a_{ij}A_i - \sum_j b_{ij}B_i\right)\Delta w_i + \sum_j (a_{ij}A_j + b_{ij}B_j)\Delta w_j = RHS$$

$$LD^{-1}U\Delta w = RHS$$

$$D = \left(\frac{1}{\Delta t} - \sum_{j \in S} a_{ij}A_i - \sum_{j \in S} b_{ij}B_i\right)$$

$$L = D + \sum_{j \in S_L} (a_{ij}A_j + b_{ij}B_j)$$

$$U = D + \sum_{j \in S_U} (a_{ij}A_j + b_{ij}B_j)$$

한편 이것을 dual-time stepping 기법으로 시간 적분하기 위해 2차 후방 시간 차분식으로 나타내며 다음과 같다.

$$\frac{dw}{dt^*} + \frac{3}{2\Delta t}w - \frac{2}{\Delta t}w^n + \frac{1}{2\Delta t}w^{n-1} + RHS = 0$$

위 식을 pseudo time step t^* 에 대해 반복 계산하여 수렴시키면 시간 간격 Δt 에 대한 비정상 유동해석 결과를 획득할 수 있다.

라. 난류 모델 구현

점성 난류 유동현상 해석에 보편적으로 사용되는 kw-sst 모델을 사용하였다. kw-sst 모델의 계산 과정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_t &= \frac{\rho k / \omega}{\max[1, \frac{\mu F_2}{a_1 \omega}]}, \quad a_1 = 0.31 \quad F_2 = \tanh \left\{ \left(\max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho \omega y^2} \right] \right)^2 \right\} \\ \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_j k - (\mu + \sigma_k \mu_\tau) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) &= \tau_{tij} s_{ij} - \beta^* \rho \omega k \\ \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_j \omega - (\mu + \omega \mu_\tau) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) &= p_\omega - \beta \rho \omega^2 + \frac{2(1-F_1) \rho \sigma_{\omega^2}}{\omega} \frac{\partial k \partial \omega}{\partial x_i \partial x_i} \\ F_1 &= \tanh \left\{ \left(\min \left[\max \left[\frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{800 \mu}{\rho \omega y^2} \right], \frac{4 \rho \sigma_{\omega^2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right)^4 \right\} \\ CD_{k\omega} &= \max \left[2 \rho \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k \partial \omega}{\partial x_i \partial x_i}, 10^{-20} \right] \\ a_1 &= 0.31 \quad \beta^* = 0.09 \quad \kappa = 0.41 \\ \psi &= F_1 \psi_1 + (1-F_1) \psi_2 \quad \psi = \{\sigma_k, \sigma_\omega, \beta, \gamma\} \end{aligned}$$

Inner model coefficients:

$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega1} = 0.5, \beta_1 = 0.075,$
 $\gamma_1 = \beta_1 / \beta^* - \sigma_{\omega1} \kappa^2 / \sqrt{\beta^*} = 0.553$

Outer model coefficients:

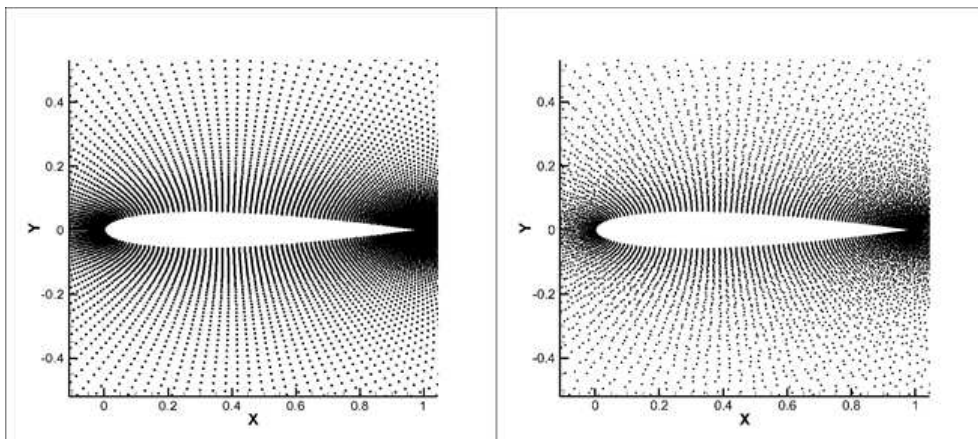
$\sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega2} = 0.566, \beta_2 = 0.0825,$
 $\gamma_2 = \beta_2 / \beta^* - \sigma_{\omega2} \kappa^2 / \sqrt{\beta^*} = 0.440$

<그림 2-3-19 kw-sst 난류모델 계산 과정>

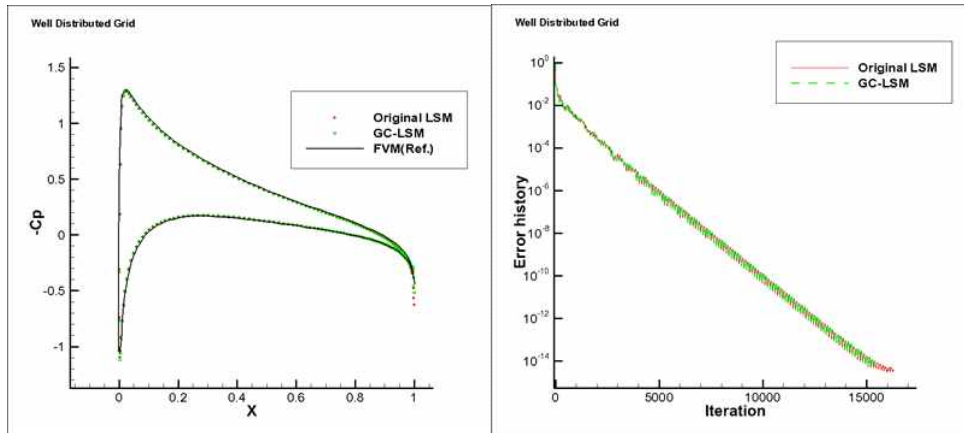
마. 해석 기법 검증

1) 기본 성능 검증

무격자 유동해석 기법을 검증하기 위해 NACA0012 익형에 대한 유동해석을 수행하였다. 해석용 질점계의 질점 개수는 약 48,000개이며, 자유류 조건으로는 마하수 0.5, 받음 각 3도, 압력 100,000Pa, 온도 300K를 사용하였다. 해석 결과 기존의 유한체적법 해석 프로그램과 동일한 정확도의 결과를 얻을 수 있으며 오차 수렴 이력 또한 장비 정확도 수준까지 수렴이 가능함을 확인하였다.



<그림 2-3-20 NACA0012 익형에 대한 무격자 유동 해석용 질점계>



<그림 2-3-21 NACA0012 익형 유동 해석 결과>

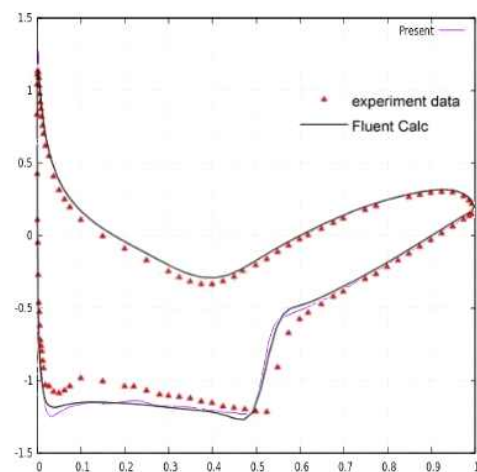
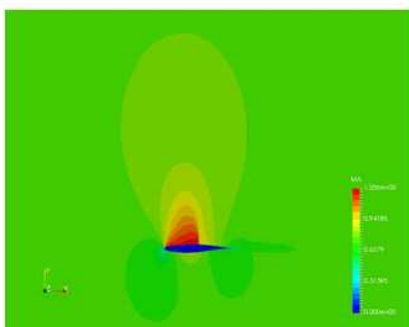
좌 : 표면 압력 계수, 우 : 오차 수렴 이력

2) 난류 모델 검증

난류 유동 해석 검증을 위해 RAE2822 익형 주위의 2차원 유동을 해석하고 이를 상용 해석 프로그램인 FLUENT의 결과와 비교하였다. 자유류 조건으로는 마하수 0.725, 레이놀즈수 $6.5E6$, 받음각 2.92° 를 사용하였다. 표면 압력 계수를 비교한 결과 본 연구에서 개발한 무격자 기반 유동 해석 프로그램이 기존 상용 프로그램인 FLUENT와 마찬가지로 점성 난류 유동현상을 정확하게 포착하고 있음을 확인하였다.

Freestream conditions -

- Mach number : 0.725
- Reynolds number : $6.5E+06$
- Angle-of-Attack(deg.) : 2.92

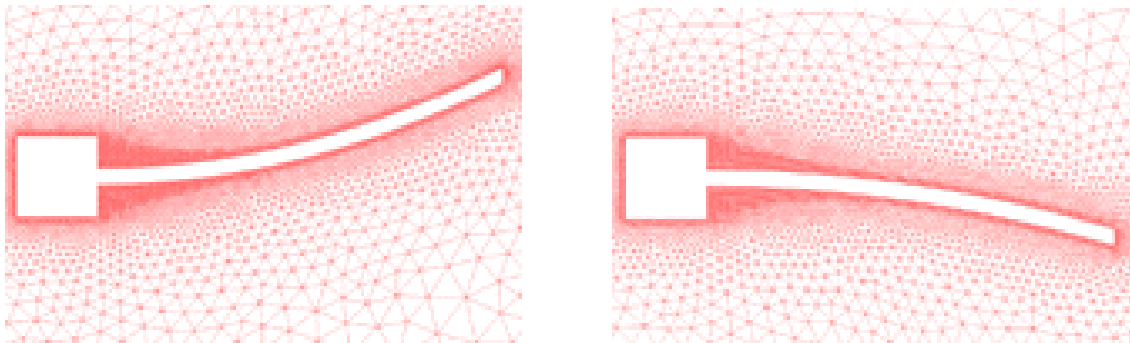


<그림 2-3-22 RAE2822 익형 2차원 유동 해석 결과>

5. 고속열차의 터널 통과 모사를 정확하고 효율적으로 처리하는 이동 질점법 개발

가. ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) 기법 적용

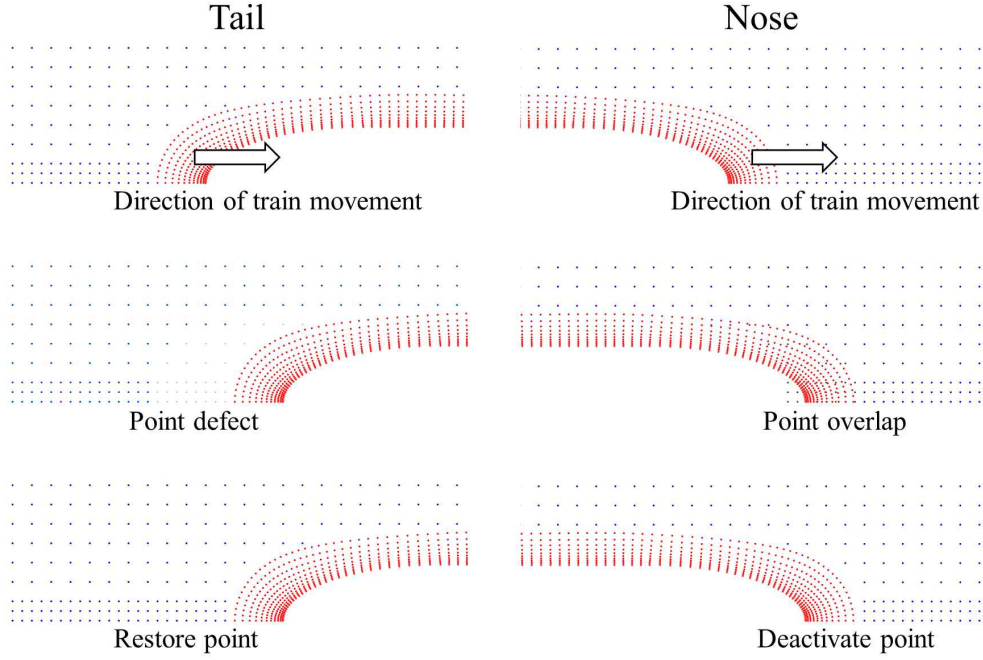
터널-열차 모형 해석에서는 터널에 대해 상대운동하는 열차의 표면 상에서 연속체 입자의 상대운동을 고려해야 한다. 이러한 이동 경계면의 해석은 기존의 유동해석 기술 방법인 라그랑지안 기법 혹은 오일러리안 기법으로는 다소 용이하지 않은데, 이에 대해 C. W. Hirt는 유동속도와 다른 입자의 속도로 움직이는 좌표계에서 유동을 관찰하는 ALE 기법을 제안하였고 이를 통해 격자의 움직임을 허용하면서도 격자에 대한 연속체 입자의 상대운동을 정확하고 강건하게 해석할 수 있게 되었다.



<그림 2-3-23 ALE 기법에 따라 변형된 격자 예시>

나. 질점 이동 처리 기법

터널-열차 간 상대운동이 존재할 때의 유동 현상을 보다 정확하게 모사하기 위해 이동 질점계 기법을 적용하였다. 해석 질점계는 터널 질점계와 열차 질점계로 구성되며, 터널 질점계는 해석영역 내에서 정지해 있는 반면 열차 질점계는 열차의 이동에 맞추어 움직이는 이동 질점계이다. 열차 질점계와 터널 질점계가 겹치는 부분에서는 해상도가 높은 열차 질점계 쪽을 선택하며, 열차 질점계 바깥 영역에서는 해석 질점계에 빈 공간이 없도록 터널 질점으로 보충한다. 그러므로 열차가 그림과 같이 이동함에 따라, 열차 전두부 근방에서 발생한 중복지역의 터널 질점은 일시적으로 계산에서 제외되는 반면, 후미부 근방에서는 터널 질점이 복구되어 해석 질점계를 채운다. 복구된 터널 질점에서의 유동값은 이전 시점의 질점계 내에서 가장 가까운 질점 4개를 탐색하여 이중 선형 보간법으로 부여한다.



<그림 2-3-24 열차의 이동에 따른 질점계 재구성>

열차가 이동하면서 질점의 위치가 변경됨에 따라 연결정보, 최소제곱법 계수 및 유동장 물리량 보간을 수행한다. 물리량 보간 계산 과정은 다음과 같다

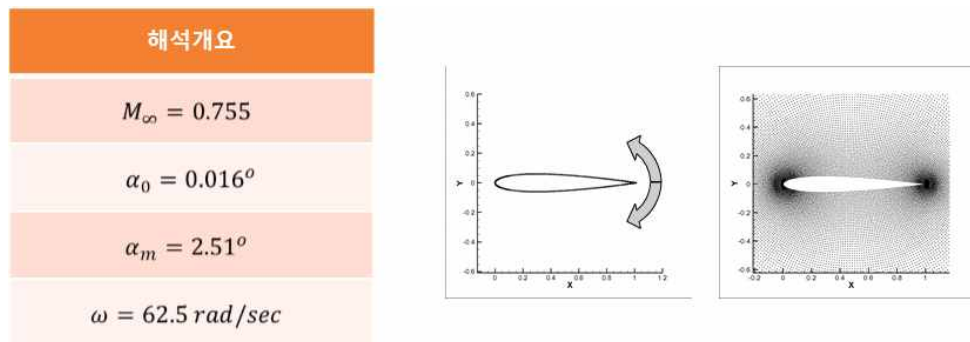
$$\begin{aligned} \frac{\overline{Q}_i^{n+1} V_i^{n+1} - \overline{Q}_i^n V_i^n}{\Delta t} &= - \sum_f (F_f - v_{g,f} \cdot n_f^n \overline{Q}_f^n) S_f^n \\ \frac{V_i^{n+1} - V_i^n}{\Delta t} &= \sum_f v_{g,f} \cdot n_f^n S_f^n \\ \frac{1}{V_i} \sum_f \phi_f S_f &= \nabla \phi_i \\ Q_i^{n+1} &= \frac{Q_i^n + [\nabla \cdot (v_g Q_i^n) - \nabla \cdot F] \Delta t}{1 + (\nabla \cdot v_g) \Delta t} \end{aligned}$$

이러한 이동질점계 해석 기법은 기존 유한체적법 격자 기법에 비해 격자 재구성이 필요하지 않으며, 질점 간의 연결 정보와 국부 질점군만 갱신하면 되므로 계산 부하를 획기적으로 감소시키는 동시에 해석 프로그램의 수치적 안정성을 비약적으로 상승시킬 수 있다.

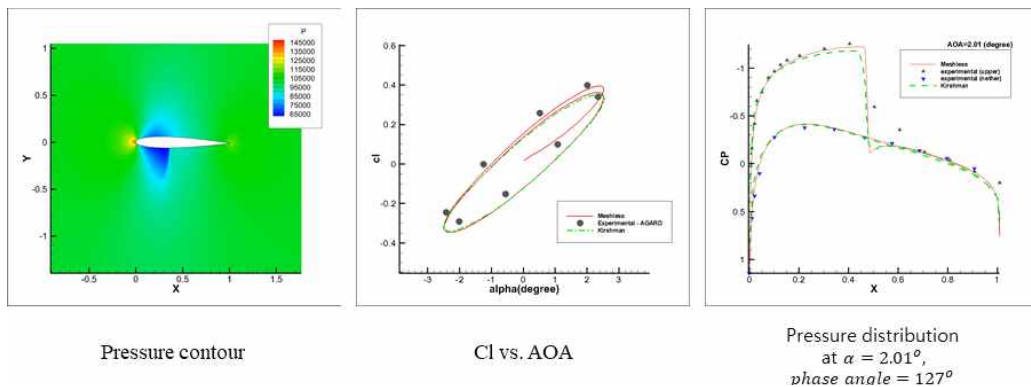
다. 이동질점계 해석 기법 검증

이동질점계 해석 기법을 검증하기 위해 NACA0012 익형의 비정상 진동에 대한 유동 해석을 수행하였다. 해당 케이스는 선행 연구에 실험 데이터와 수치해석 결과가 모두 존재하므로 본 연구에서 개발한 이동 질점계 해석 기법의 검증 문제로 채택되었다. 해석 조건 및 해석 결과는 다음과 같다.

$$\text{시간에 대한 반응각} = \alpha_0 + \alpha_m \sin(\omega t)$$



<그림 2-3-25 NACA0012 익형 비정상 진동 문제 해석 조건 개요>

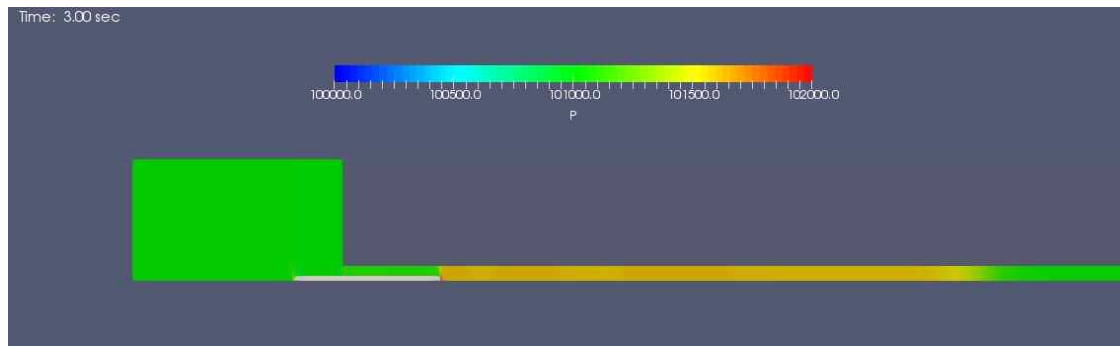


<그림 2-3-26 NACA0012 익형 비정상 진동 문제 해석 결과>

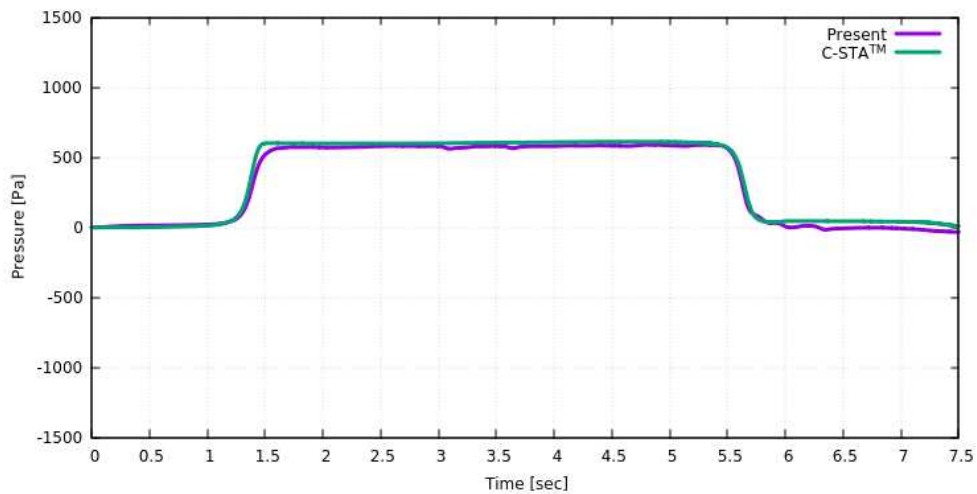
라. 터널 통과 열차 해석 케이스

개발된 이동 질점계 해석 기법을 실제 터널-열차 모형에 적용하였다. 선행 연구로서 수치해석 결과가 존재하는 Emmequerung 터널 모형에 대한 유동해석을 수행하였으며, 터널 벽면에서의 압력 변화를 획득하여 선행 연구의 결과와 비교하였다. Emmequerung 터널의 제원은 단면적 75.9m^2 , 길이 $1,633\text{m}$ 이며, 열차는 Alstom사의 ETR 470 전동차를 사용하였고 열차의 길이와 주행 속도는 각각 236.5m , 198.5km/h 이다. 그림과 같이 열차의 운동에 따라 터널 내 압력과 및 압력장이 잘 묘사되고 있으며, 선행 연구의 결과와

잘 일치함을 확인하였다.



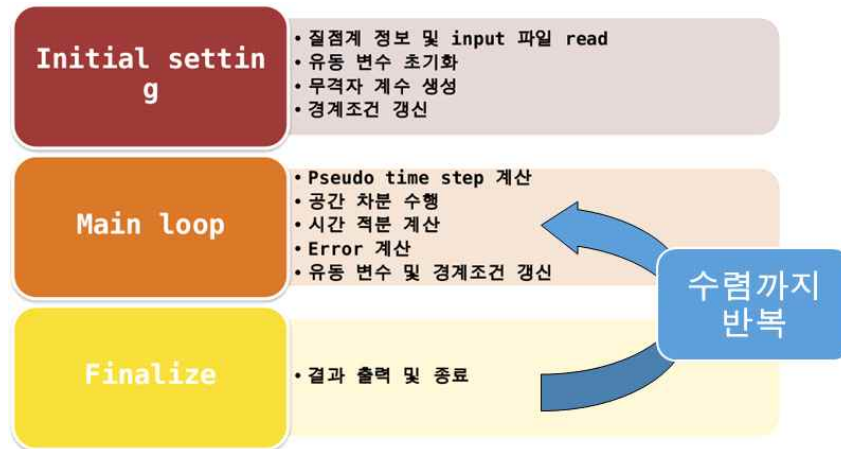
<그림 2-3-27 터널 내 압력 분포 (t=3sec)>



<그림 2-3-28 터널 벽면 압력 변동 이력 (터널 입구로부터 462m 지점)>

마. 해석 프로세스 간소화

이동 질점 처리와 유동 정보 갱신 등 여러 해석 과정이 반복적으로 진행되는 해석 프로세스를 간소화하여 해석 효율을 높이려고 하였다. 본 연구에서 개발한 해석 프로그램의 프로세스는 그림의 flow chart와 같이 초기 설정, 메인 루프, 결과 데이터 출력으로 구분할 수 있다. 초기 설정은 사용자 입력에 따라 질점계 생성 및 입력을 수행하며, 유동 변수를 초기화하고 무격자 계수와 경계조건을 생성하여 유동 해석을 실행하기 위해 프로그램을 준비한다. 메인 루프에서는 시간 간격 계산, 공간 차분 및 시간 적분 수행, 수렴 오차 계산, 이동 질점 유동값 갱신 및 경계조건 갱신 등 실제 유동해석을 위한 반복 계산을 수행한다. 마지막으로 유동 해석이 종료되면 결과 데이터를 파일로 출력한 뒤 프로그램이 종료된다.



<그림 2-3-29 압축기 경계조건 계산 프레임워크 모식도>

6. 소결

본 연구에서는 고속열차 전용 CFD 해석 프로그램을 개발하여 터널-열차 모형에 대해 강건하고 정확한 유동해석을 수행하는 동시에 압축기 적용 시의 공기력 저감 효과를 검토할 수 있는 수치해석 기반을 마련하고자 하였으며, C-STA의 형상 전처리 기법과 무격자 기반 유동해석 기법을 사용한 프로그램으로 다음과 같은 성과를 얻었다.

- 주요 형상 파라미터의 간단한 입력만으로 해석영역 구성 및 해석용 질점계를 용이하게 생성할 수 있는 형상 전처리 기법을 개발하였으며, 이를 그래픽 유저 인터페이스로 제어할 수 있는 형상 모델러를 개발하였다.
- 압축기 유입구 및 토출구에서의 유동 조건을 계산할 수 있는 압축기 성능곡선 및 모듈을 도출하였으며, 유동 해석 프로그램과 압축기 모듈을 연동하여 경계조건을 부여하는 프레임워크를 구축하였다.
- 격자 정보 없이 질점만으로 구성된 해석 질점계 상에서 지배방정식인 나비에-스톡스 방정식을 이산화하여 점성 난류 유동 해석을 수행할 수 있는 무격자 기반 유동해석 기법을 개발 및 검증하였다.
- 이동 물체를 포함하는 유동 현상을 해석할 수 있도록 ALE 및 질점 추가/삭제 기법을 도입하였으며, 실제 터널-열차 모형에 대한 해석을 수행하여 본 연구에서 개발한 고속열차 전용 CFD 프로그램의 해석 프로세스를 검증하였다.

제 4 절 압축기 적용 고속열차 해석 프로그램(GUI) 개발

1. 개요

앞 절에서 개발된 유동 해석 프로그램은 정확성이 검증되어 실제 고속열차 문제에 응용할 수 있으나, 리눅스 운영체제 상에서 텍스트 유저 인터페이스로만 구동할 수 있고 후처리를 위해 외부 프로그램과 연동하는 과정이 필요하여 프로그램 배포 및 사용법 전달에 불필요한 인력이 소모된다. 이에 대해 통상적인 CFD 해석 프로그램과 같이 그래픽 유저 인터페이스 (GUI)를 구성할 경우 프로그램 구동의 난이도가 경감되어 범용성이 크게 향상되는 효과가 있다.

그래픽 유저 인터페이스의 구동 환경은 통상적인 계산 장비의 운영체제가 리눅스 계열임을 감안하여 python과 연동할 수 있는 GUI 라이브러리(GTK, Qt 등)를 사용하여 구성된다. 해당 라이브러리 중 일부는 공개 소스이며 사용자 간의 정보 교류가 활발하여 프로그램 개발에 소요되는 기간 및 인력을 크게 절감할 수 있다. 또한 그래픽 윈도우의 구성을 임의로 배치할 수 있어 고속열차 해석에 특화된 화면 구성이 가능하다.

본 절에서는 고속열차 전용 CFD 해석 프로그램을 용이하게 구동할 수 있도록 PyGTK 기반 그래픽 유저 인터페이스를 개발하였다. 형상 전처리 및 해석 결과 후처리를 위해 다양한 그래픽 관련 정보 처리 및 가시화를 수행할 수 있는 라이브러리를 사용하였으며, 고속열차 해석에 특화된 사용자 환경을 구성하여 다양한 형상 파라미터 및 조건에 대해 빠른 유동해석을 수행할 수 있도록 하였다.

개발된 해석 프로그램 및 그래픽 유저 인터페이스에 대한 검증 해석을 수행하였다. 선행 연구로서 시험 측정 자료와 수치해석 결과가 존재하는 복안터널 문제를 해석하여 미기압과, 이명감 등의 해석 결과를 비교하였다. 검증된 해석 프로그램으로 압축기 적용 효과에 대한 실증 해석을 수행하여, 압축기의 공기력 저감 효과를 검토하였다.

2. 그래픽 사용자 환경(GUI) 개발

가. 개발된 이동 질점법 유동해석 프로그램의 PyGTK 기반 사용자 환경 제작

본 연구에서 개발한 이동 질점법 유동해석 프로그램을 구동할 수 있는 사용자 환경을 제작하였다. 이동 질점법 유동해석 프로그램은 통상적인 전산유체역학 해석툴의 실행 환경인 리눅스 기반 운영체제를 채택하였으므로, 사용자 환경 제작을 위한 도구 또한 리눅스 운영체제에 기본으로 설치되어 사용할 수 있는 파이썬 (Python) 언어를 사용하였다. 파이썬은 다양한 공개 라이브러리를 활용하여 프로그램 제작 기간을 단축시킬 수 있으며, 특히 PyGTK 라이브러리를 통해 그래픽 유저 인터페이스를 용이하게 구성할 수 있다.

프로그램이 정상적으로 실행되기 위해서는 GUI에서 사용되는 여러 가지 라이브러리들이 설치되어 있어야 한다. 리눅스는 계열에 따라 설치하는 방법이 다양하므로 서버 또는 개인 사용자가 대부분 사용하는 RedHat 계열 CentOS, Debian 계열 Ubuntu 운영체제를 중심으로 라이브러리 설치 방법을 다음과 같이 나열하였다.

Gtk2 라이브러리는 python 언어를 통해 그래픽 유저 인터페이스를 용이하게 구성할 수 있도록 관련 위젯과 함수를 제공한다. VTE는 그래픽 유저 인터페이스 상에서 가상 터미널을 실행하여 유동 해석 프로그램의 실행, 제어, 결과출력 등을 수행한다. vtk-python 및 pygtkglex는 그래픽 위젯을 제공하여 사용자 인터페이스 상에서 형상곡선, 해석 질점계, 유동해석 결과를 가시화할 수 있다. gnuplot 및 matplotlib는 그래프 출력 전용 라이브러리로서 사용자 인터페이스 상에서 시간-압력 그래프, x-t 선도 컨투어 등의 그래프를 가시화할 수 있다. numpy는 숫자 계산 라이브러리로서 해석 결과 데이터를 GUI 상에서 직접 처리할 수 있는 수치 함수를 제공한다.

추가로 Ubuntu 계열의 사용자 중 위의 표에 나열된 설치 명령어가 현재 설치하려는 시스템에서 지원하지 않을 경우 synaptic package manager 프로그램을 통해 설치할 수 있다. CentsOS 계열에서는 yum 명령어가 지원되지 않을 경우 시스템 관리자의 도움을 받아 별도로 설치해야 하며, 외부 네트워크와 연결이 불가능한 환경일 경우 설치하고자 하는 라이브러리의 소스코드를 이용하여 직접 컴파일 후 설치해야 한다.

GUI의 설치에 최초 설치 파일인 INTUIT.tar.gz 파일의 압축을 해제한 뒤 4개의 폴더(GUI, grid, solv, post)를 확인한다. 이어서 터미널에서 압축을 푼 위치로 이동한 후 “./compile”을 입력하여 장비에 설치된 컴파일러로 유동해석 프로그램을 다시 컴파일한다. 프로그램의 실행은 GUI 폴더로 이동하여 ./INTUIT을 실행하면 해석 프로그램의 GUI가 실행된다.

<표 2-4-1 CentOS 및 Ubuntu 환경에서의 패키지 설치 명령어>

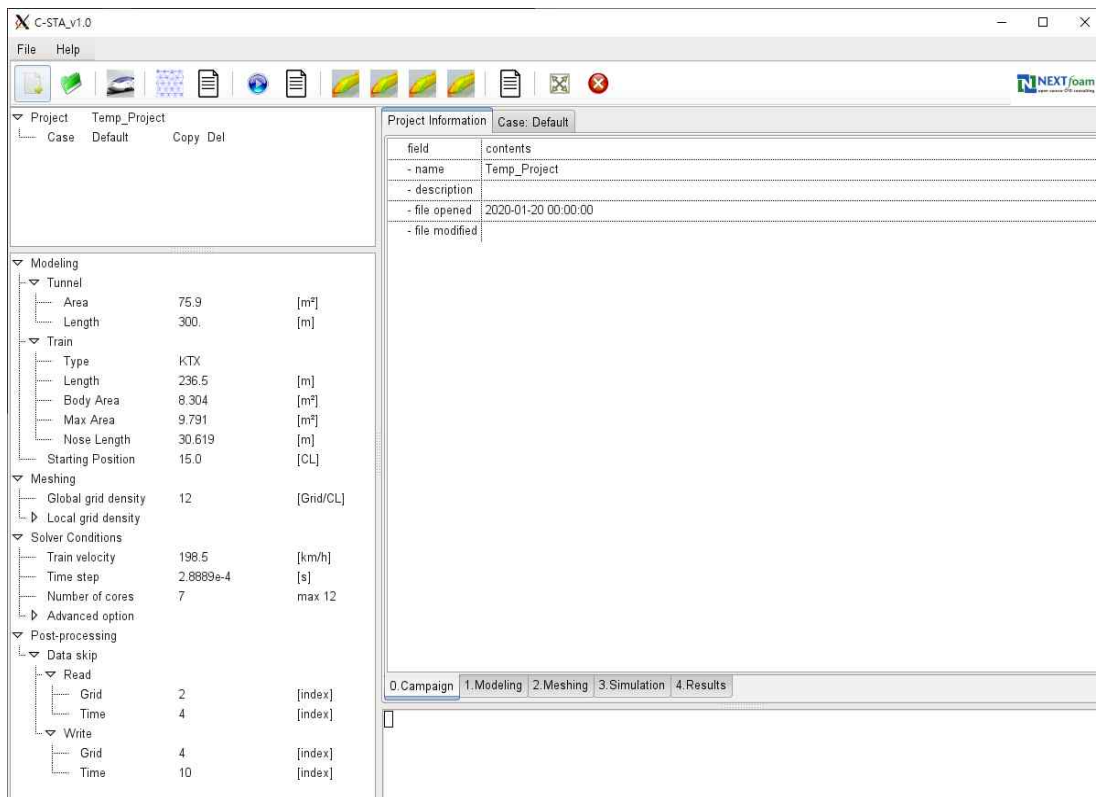
설치 환경	패키지 설치 명령어
CentOS	<pre> yum install gtk2 yum install vte yum install vtk-python yum install pygtkglext yum install gnuplot yum install numpy pip install python-pip pip install matplotlib </pre>
Ubuntu	<pre> sudo apt-get install gtk2 sudo apt-get install vte sudo apt-get install vtk-python sudo apt-get install pygtkglext sudo apt-get install gnuplot sudo apt-get install numpy pip install python-pip pip install matplotlib </pre>

나. 파이썬 (Python) 언어를 이용한 고속열차 해석 특화 GUI 제어 화면 구현

해석 프로그램 GUI의 화면 구성은 아래 그림과 같다. GUI의 최상단에는 해석 케이스를 제어할 수 있는 프로젝트 생성/로드 버튼, 형상곡선 생성 버튼, 격자 생성 및 확인 버튼, 솔버 생성 및 확인 버튼, 후처리 버튼이 위치해 있으며, 유동 해석 과정에서는 해당 버튼들을 좌에서 우로 차례로 클릭하며 해석 케이스를 관리하게 된다.

각 해석 케이스는 폴더 단위의 프로젝트로 관리되며, GUI를 처음 실행하면 Temp_Project라는 이름의 예시 프로젝트가 자동으로 생성되고 이를 화면 좌측 상단의 프로젝트 매니저에서 확인할 수 있다. 사용자가 원하는 경로와 이름으로 프로젝트의 이름을 설정하여 저장하면 프로젝트 매니저에 수정사항이 즉시 반영된다. 각 해석 프로젝트는 여러 개의 해석 케이스를 포함할 수 있으며, 프로젝트를 처음 생성하면 Default라는 이름의 기본 케이스가 생성되어 있다. 사용자는 이를 복제하여 다른 설정의 해석 케이스를 여러 개 만들거나 삭제할 수 있다.

GUI의 좌측 하단에는 해석 케이스의 설정을 입력할 수 있는 트리 메뉴가 있다. 좌측 상단에서 선택한 해석 케이스의 설정이 표시되며, 다른 케이스를 선택할 경우 해당 케이스의 설정이 자동으로 로드되어 트리메뉴에 업데이트된다. 트리메뉴의 입력 항목은 다음과 같다.



<그림 2-4-1 고속열차 해석 특화 GUI 제어 화면 구성>

<표 2-4-2 GUI 트리메뉴의 입력 항목>

입력 항목		세부 항목	설명
Modelling	Tunnel	Area	터널 단면적
		Length	터널 길이
	Train	Type	열차 형상
		Length	열차 길이
	Starting position	Distance	초기 거리
Meshing	Point density	Global	질점 밀도
		Local	국부질점 밀도
Solver conditions	Main option	Train velocity	열차 속도
		Time step	시간 간격
		Number of cores	병렬 코어 개수
	Advanced option	Acceleration length	가속 거리
		Calculation time	해석 시간 범위
		Governing equation	지배방정식
		Spatial Accuracy	공간정확도
		Time accuracy	시간정확도
		Boundary interpolation	경계조건 차수
Post-processing	Data I/O interval	Read	데이터 입력 간격
		Write	데이터 출력 간격

GUI의 우측 상단부에는 동작 결과를 확인할 수 있는 다용도 위젯 노트북이 위치해 있다. Project Information 탭에서는 현재 GUI에서 관리 중인 해석 프로젝트의 각 케이스에 대한 정보를 스프레드시트 형태로 확인할 수 있으며, 해당 파일은 프로젝트 폴더에 OpenPyXL 라이브러리를 통해 엑셀파일로 출력되어 추후 다른 용도로 활용할 수 있다. 스프레드시트에 표시되는 정보는 사용자가 입력한 터널-열차 모형의 치수 및 geometry 관련 정보, 질점 생성 개수, 유동 해석 옵션 및 주요 해석 결과, 미기압과 및 이명감 분석 결과 등이 해석 완료 이후 자동으로 업데이트된다. Case 탭은 각 해석 케이스의 개수에 맞게 생성되며, 각 케이스에 대한 그래픽 가시화 결과를 출력한다. 형상곡선 생성 결과, 질점 생성 결과, 유동 해석 결과 x-t선도, 미기압과 그래프 등을 출력할 수 있으며, 좌표축 탐색 툴바 및 마우스 인터랙션을 통해 드래그, 확대 등의 범위 조작이 가능하다. 또한 출력 결과는 이미지 파일로 저장하여 즉시 활용할 수 있다.

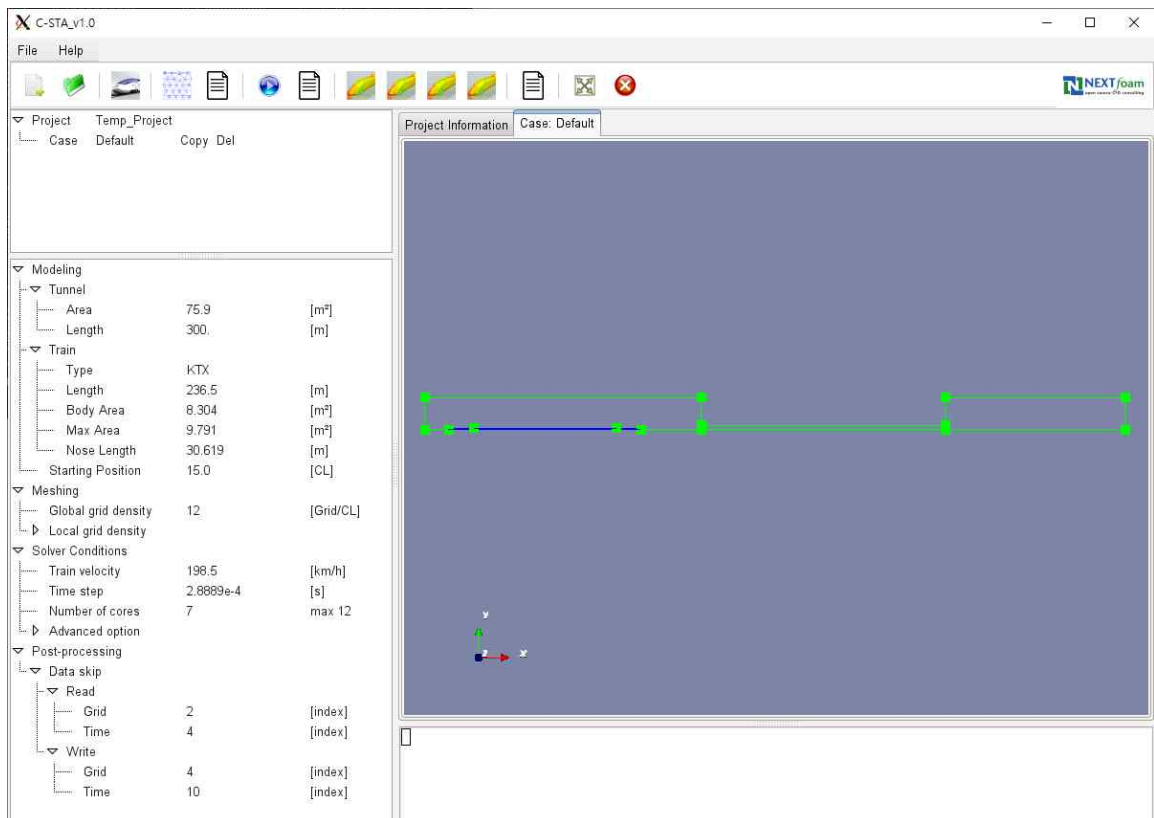
GUI의 우측 하단부에는 VTE 위젯이 위치하여 사용자가 실행한 하위 프로그램의 Standard Output 및 Standard Error 출력 결과를 실시간으로 확인할 수 있으며, 별도의 조작이 필요할 경우 커맨드를 입력하여 유동 해석 프로그램 등을 직접 제어할 수 있다.

3. 전후처리 환경

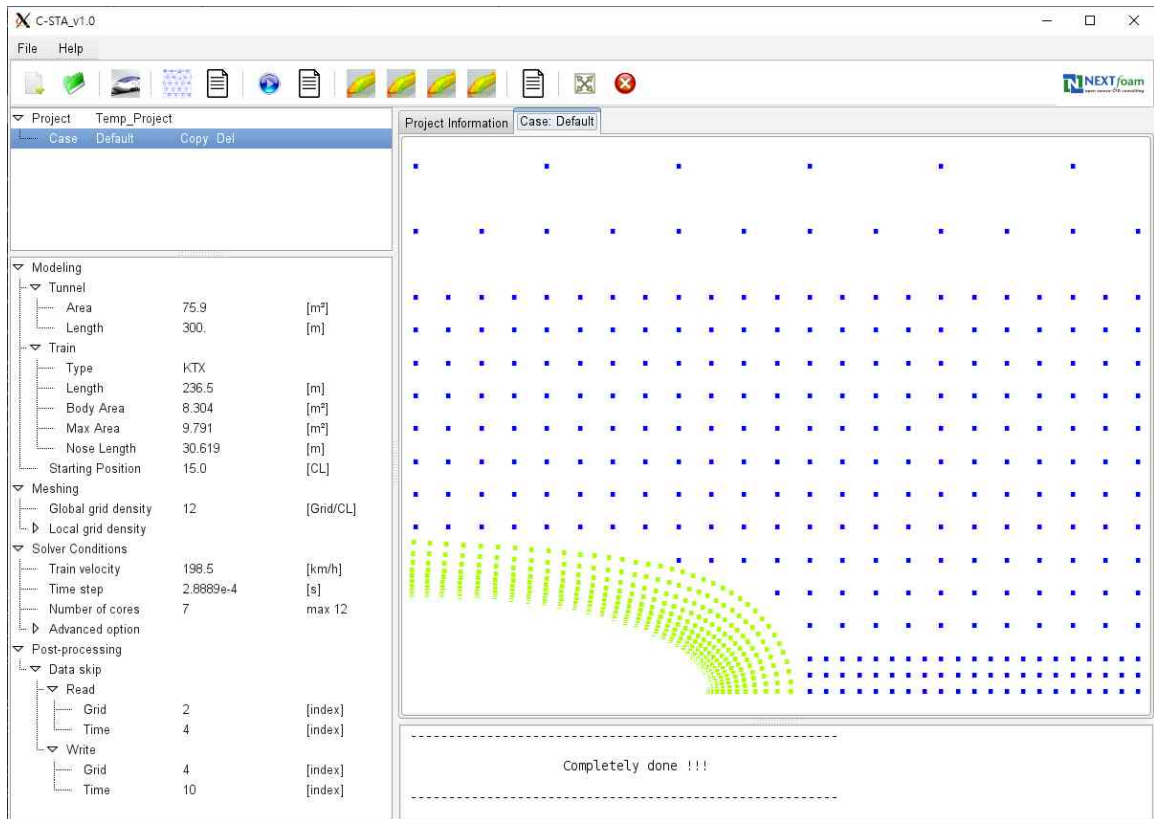
가. 열차형상 모델링 및 해석 질점생성 사용자 전처리 환경

먼저 GUI에 터널-열차 모형의 형상 파라미터를 입력하여 형상곡선 모델링을 수행한다. 좌측 트리메뉴에서 C-STA와 같은 5종의 주요 파라미터 (터널 길이, 터널 단면적, 열차 길이, 열차 전두부 형상, 터널-열차 초기 거리)를 입력한 뒤 상단의 create geometry 버튼을 누르면 1차년도에 개발된 형상 Modeller와 연동하여 형상곡선이 생성되며, 생성 결과를 GUI에서 확인할 수 있다.

형상곡선을 확인한 뒤에는 유동해석용 질점계를 생성한다. 좌측 트리메뉴의 Meshing 항목에 질점 밀도를 입력하여 해석용 질점계의 조밀함을 조절할 수 있다. 질점 밀도는 단일 특성 길이 (터널 반지름 기준) 안에 몇 개의 질점을 배치할 것인지를 파라미터로 하여 조절되며, 본 연구에서의 해석 결과 질점 밀도를 12 정도로 설정하는 것이 해석 정확도와 속도를 모두 확보할 수 있는 절충점으로 판단된다. 질점 밀도를 설정한 뒤 GUI 상단의 Generate point system 버튼을 누르면 해석용 질점계가 생성되어 이를 GUI 상에서 확인할 수 있다.



<그림 2-4-2 형상 파라미터를 입력하여 열차 형상곡선 생성>



<그림 2-4-3 GUI 상에서 질점 생성 및 가시화>

나. 해석 후 유동 현상 가시화를 위해 paraview를 외부 프로그램으로 연동

해석이 완료된 케이스에 대해 해석 결과 데이터파일을 paraview로 가시화하는 인터페이스를 구축하였다. 유동 해석 프로그램이 종료된 후 GUI 상단의 가시화 버튼을 클릭하면 미리 작성된 paraview 스크립트가 실행되는데, 이 스크립트는 파이썬 언어로 작성되어 paraview의 실행부터 변수/좌표축 설정 및 가시화 스타일을 설정함으로써 고속열차 해석에 특화된 그래프 및 컨투어를 자동 생성한다.

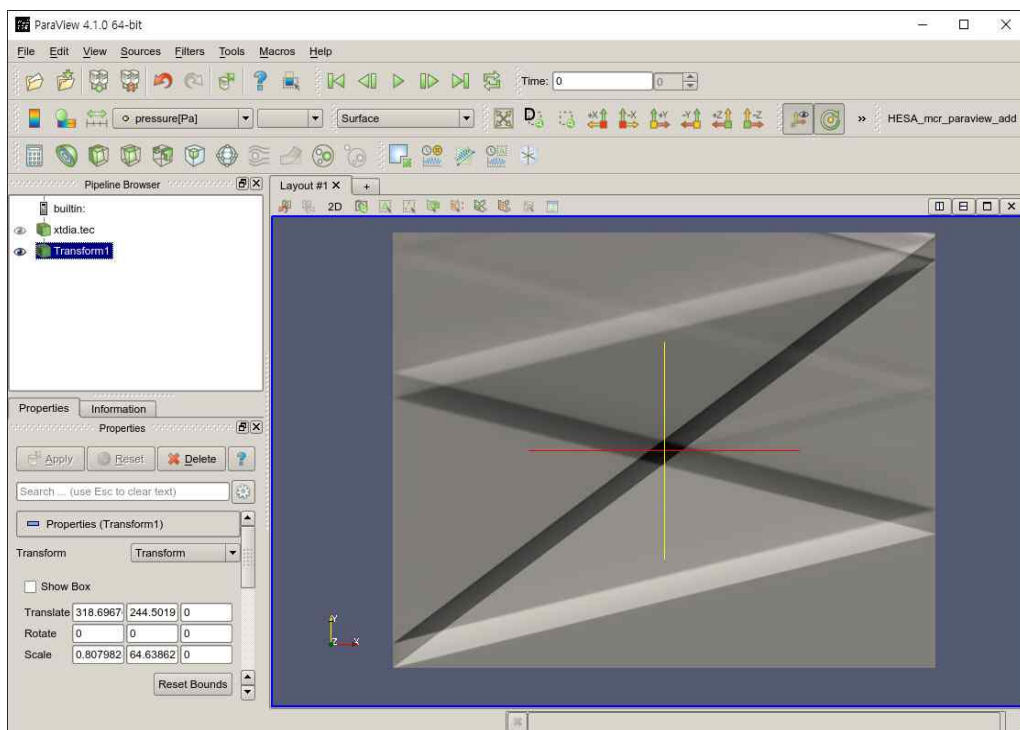
통상적으로 고속열차 해석 시 작성되는 그래프에는 시간-압력 변동이력, 거리-시간 압력 컨투어, 시간-미기압과 세기, 시간-항력, 시간-객실 내부 압력 등이 있다. 각 항목에 대해 스크립트를 작성하여 GUI 상에서 해석 완료된 후 항목에 맞는 후처리 버튼을 클릭하면 추가 조작 없이 해당하는 후처리 결과가 가시화된 paraview 화면으로 연결되도록 개발하였다.

```

1  try: paraview.simple
2  except: from paraview.simple import *
3  paraview.simple._DisableFirstRenderCameraReset()
4
5  initial_dat = TecplotReader( FileNames=['initial.dat'] )
6
7  initial_dat.DataArrayStatus = ['Density', 'V_X', 'V_Y', 'V_Z', 'V_MAGNITU
8
9  RenderView1 = GetRenderView()
10 RenderView1.CenterOfRotation = [0.0200000005424954, 0.050000001734588295,
11
12 DataRepresentation1 = Show()
13 DataRepresentation1.EdgeColor = [0.0, 0.0, 0.5000076295109483]
14 DataRepresentation1.SelectionPointFieldDataArrayName = 'BCWALL'
15 DataRepresentation1.ScalarOpacityUnitDistance = 0.0020610556532555066
16 DataRepresentation1.ExtractedBlockIndex = 1
17 DataRepresentation1.Representation = 'Outline'
18 DataRepresentation1.ScaleFactor = 0.01020000035641715
19
20 RenderView1.CameraPosition = [0.0200000005424954, 0.050000001734588295, 0
21 RenderView1.CameraFocalPoint = [0.0200000005424954, 0.050000001734588295,
22 RenderView1.CameraClippingRange = [0.1839537386989502, 0.2840493408427114
23 RenderView1.CameraParallelScale = 0.05901694867859698
24
25 Contour1 = Contour( PointMergeMethod="Uniform Binning" )
26

```

<그림 2-4-4 유동 현상의 paraview 가시화를 위해 작성된 파이썬 스크립트>

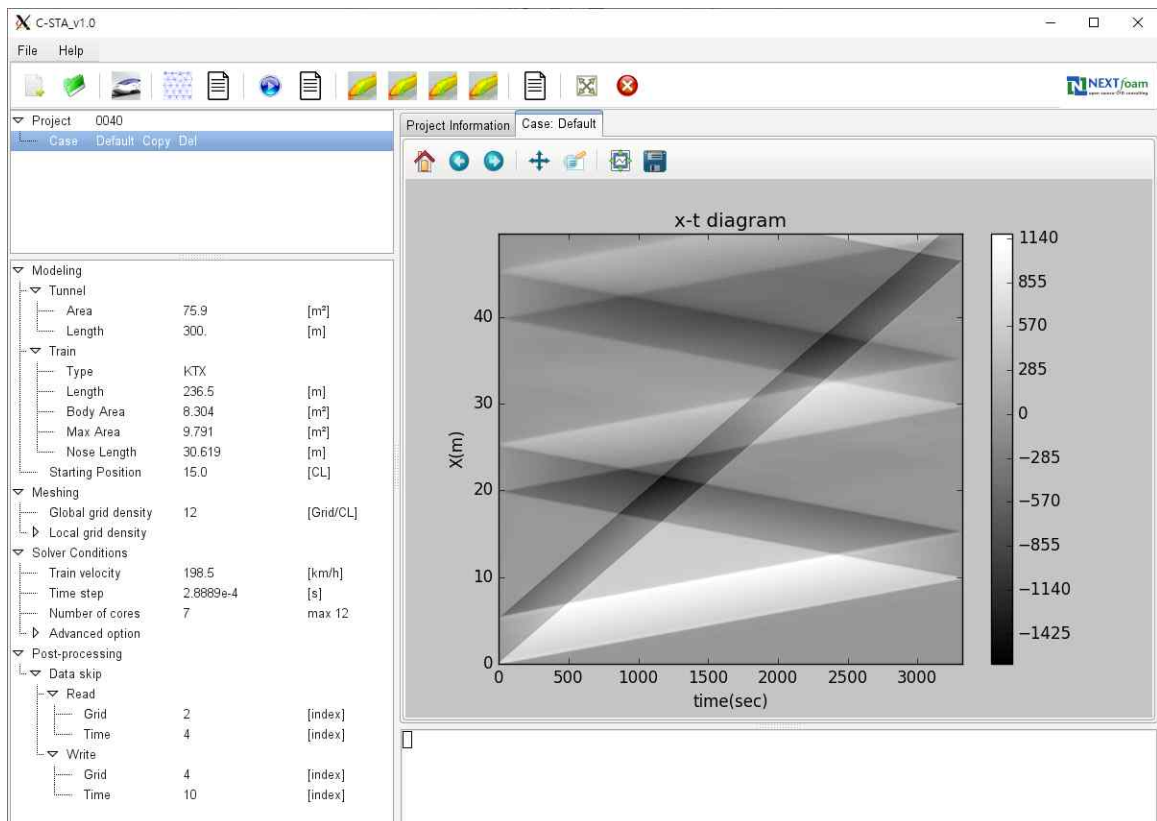


<그림 2-4-5 스크립트를 통해 자동 생성된 x-t 선도>

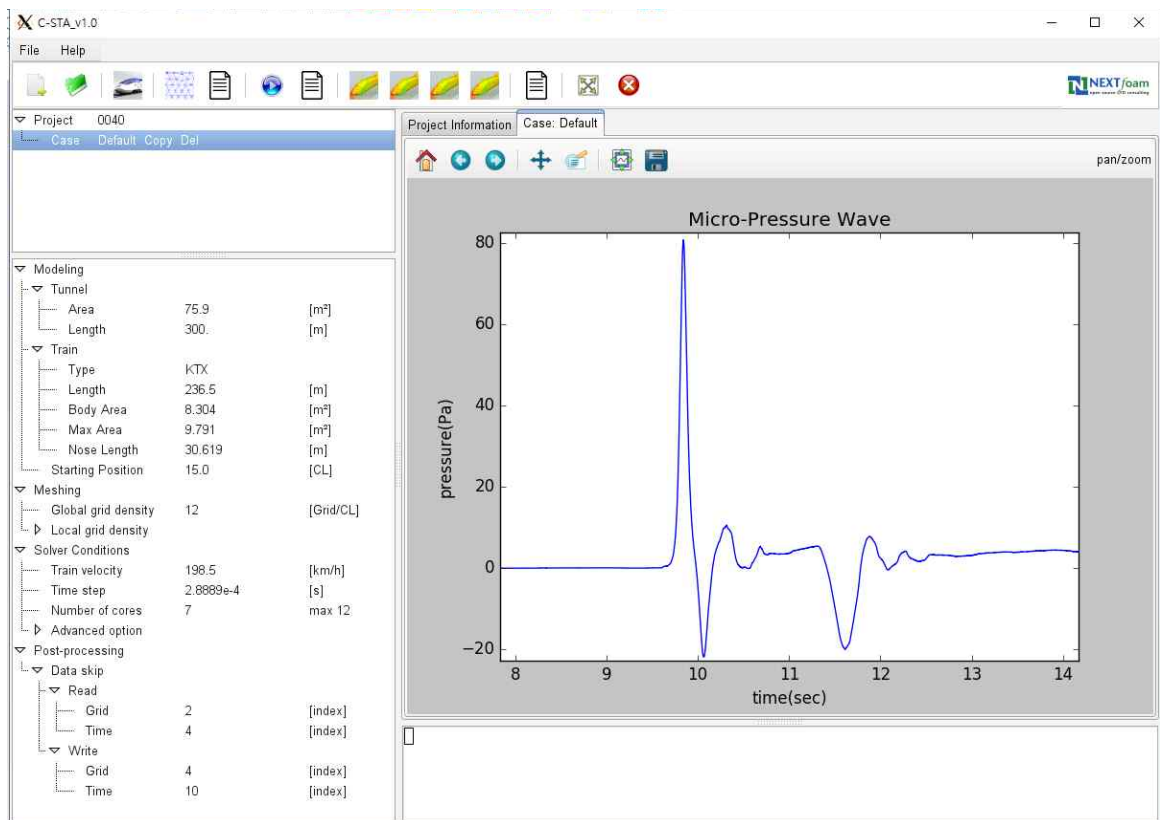
다. 터널 통과 시 발생하는 압력영향 인자에 대한 2차원 도표 자동 생성

해석이 완료된 후 터널 내부에서의 압력 변동 이력을 거리-시간 공간에 대한 2차원 컨투어로 가시화할 수 있다. 실행이 완료된 케이스를 GUI 좌측 상단의 트리메뉴에서 선택한 뒤 상단의 View x-t diagram 버튼을 클릭하면 다음과 같이 x-t diagram이 GUI의 그래픽 윈도우에 출력된다.

X-t diagram에서 특정 위치 ($x=c$), 특정 시간 ($t=t_0$), 특정 객차에서의 압력 변동 이력을 추출할 수 있다. GUI 상단의 View p-t, View p-x, view cabinP 버튼을 각각 클릭하여 원하는 위치/시점/객차를 입력하면 해당 조건에서의 압력 변동 이력이 GUI의 그래픽 윈도우에 출력된다.



<그림 2-4-6 해석 결과 x-t diagram>



<그림 2-4-7 해석 결과 미기압과 변동 이력>

4. 개발 프로그램 실증

가. 검증 Case 선정

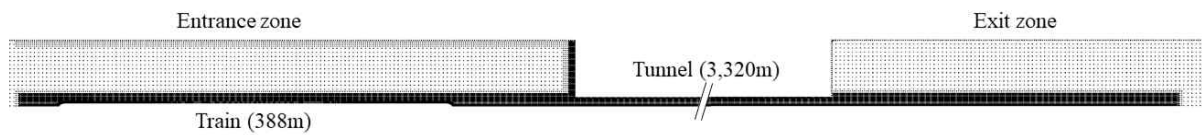
개발된 해석 프로그램을 검증하기 위해 경부고속선의 복안터널을 KTX열차가 통과하는 상황에 대한 유동해석을 수행하였다. 해당 문제에 관해서는 한국철도기술연구원이 2011년에 동일 조건 하에서 수행한 압력 변동시험 측정자료가 존재하며, C-STA를 사용한 유한체적법 유동해석 프로그램 해석결과 역시 존재하므로 본 연구에서 개발한 유동해석 프로그램의 검증 문제로 채택되었다. 선행 연구와 동일한 해석 조건으로 프로그램을 설정하여 유동 해석을 수행한 뒤 해석 결과를 실험 측정자료 및 유한체적법 프로그램 해석 결과와 비교하였다.

나. 해석 조건

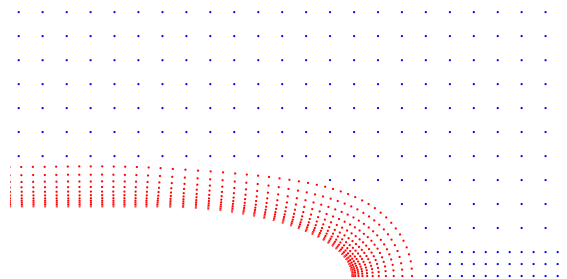
복안터널 모형에 대한 해석 질점계를 그림과 같이 생성하였다. 복안터널의 길이는 3,320 m, 단면적은 107 m²이며, KTX 열차의 길이는 388m, 단면적은 10.008 m²이다. 열차 표면에서의 점성 난류 유동현상을 포착하기 위해 다음 그림과 같은 경계층 질점을

생성하였으며, 첫 경계층의 높이는 특성 길이의 0.001배로 설정하여 y+값이 약 1이 되도록 하였다. 전체 경계층의 높이는 특성 길이의 0.2배로 설정하였다. 이 때 생성된 해석 질점의 개수는 후술할 질점 민감도 평가를 반영했을 때 210,380개이다.

열차의 주행 속도는 258 km/h로 설정하였으며, 초기 조건의 사전 수렴 없이도 수치적인 압축파를 억제하면서 열차의 속도 조건을 부여할 수 있도록 smooth start 기법을 적용하였다. 원방 경계에는 무반사 조건인 리만 불변량 조건을 부여하였고, 계산 시간 간격은 무차원화된 특성 시간의 0.02배로 설정하였다.



<그림 2-4-8 검증 Case에 대해 생성된 해석 질점계>



<그림 2-4-9 경계층 질점>

다. 검증 항목

해석 기법의 거증을 위하여 2011년 한국철도기술연구원이 경부고속선 북안터널 내에서 수행한 압력 변동 시험과 동일한 조건에서 전산해석을 수행하여 그 결과를 시험 결과와 비교하였다. 터널 입구로부터 470m 위치에서 측정된 압력 변동 이력을 시험 측정치와 비교하였으며, 기존의 유한체적법 프로그램 활용 연구에서 도출된 터널 벽면에서의 시간에 따른 압력 변동 이력 비정상 해석 결과 또한 비교하였다. 또한 터널 출구로부터 20m 지점에서 측정되는 최초 압력파의 세기 (미기압파)를 비교하였으며, 객실 내에서 측정되는 압력변동 및 승객이명감을 비교하여 검증하였다.

열차가 고속으로 터널에 진입할 때, 열차 전방에서 압축파가 생성되어 터널 내를 음파의 속도로 진행한다. 터널 출구에서 반사된 압축파는 팽창파로 바뀌어 다시 터널 입구 방향으로 전파되게 되며, 이러한 압축파 및 팽창파로 인하여 터널 내 압력은 지속적으로 급격히 변화하게 되는데, 이러한 압력 변동의 영향으로 열차 내부의 압력도 변화하게 된다. 또한 열차 내부의 압력변동은 승객의 이명감을 유발하게 되는데, 이에 따라 국내에

서는 차량의 제작과 선로의 설계 시에 객실 내 기압변화의 기준을 만족할 수 있도록 별률로서 규정하고 있으며, 국내의 200 km/h 이상 고속철도는 이를 고려하여 차량의 기밀도, 터널의 단면적 등을 결정하여야 한다.

철도차량의 터널 통과 시 객실에서 발생하는 승객이명감에 대한 국외 기준을 다음 표에 나타내었다. UIC code 779-11에 따르면 터널에 단수 혹은 다수의 열차가 진입하여 주행할 때 발생하는 압력변동에 의한 승객 이명감을 보장하기 위해 최소 터널 단면적을 규정하게 되며, 이는 현대의 고속철도에서 터널 단면적을 설정하는 가장 중요한 인자가 된다. 승객이명감의 기준은 국가별, 기밀/비기밀, 단독주행/교행, 서비스 레벨 등에 따라 상이하다.

<표 2-4-3 승객 이명감에 대한 국제 기준>

기준	주행 속도 (km/h)	차량 기밀도	기준
UIC 779-11 2 nd edition, 2005	180-220, 200-350	비기밀 차량, 기밀 차량	○ 비기밀 차량 (차량 기밀도 0.5s 미만) - 4.5 kPa/4 sec - 3.0 kPa/4 sec ○ 기밀 차량 (차량 기밀도 0.5s 초과) - 1,000 Pa/1 sec - 1,600 Pa/4 sec - 2,000 Pa/10 sec
UIC 660 2 nd edition, 2002	250 이상	기밀 차량 (차량 기밀도 18s 이상)	- 500 Pa/1 s - 800 Pa/3 s - 1,000 Pa/10 s - 2,000 Pa/60 s

승객 이명감에 대한 국제적인 기준은 UIC code 779-11와 UIC code 660에서 각각 다루고 있다. UIC code 779-11은 ERRI에서 제시한 기본 승객이명감(Base-line pressure comfort criteria)를 비기밀 차량과 기밀 차량으로 구분하여 제시하고 터널 단면적 설계에 이용할 것을 권고하고 있다. 기밀 차량의 경우 권고하는 승객이명감 기준은 1초간 1000 Pa, 4초간 1600 Pa 및 10초간 2000 Pa이다.

UIC code 660은 유럽 내의 (타국) 고속철도 노선에서 운행하기 위하여 운행속도 250 km/h 이상의 고속열차가 만족하여야 하는 기술적 규정들을 제시하고 있다. 본 규정에서 제시하는 승객이명감 기준은 독일의 기준과 유사하게 객실 내에서 1초간 500 Pa, 3초간 800 Pa, 10초간 1000 Pa 및 60초간 2000Pa 이하의 압력변동이며, 고속열차의 기밀도 τ 가 18 sec 이하가 되도록 규정하고 있다.

국내의 경우에는 2006년 고시된 철도차량 안전기준에 관한 지침에서 차량의 기밀도와 승객 이명감 기준을 규정하고 있는데, 유럽 UIC 660의 규정과 동일하게 객실 내에서 1초간 500 Pa, 3초간 800 Pa, 10초간 1000 Pa, 60초간 2000 Pa 이하의 압력변동이 발생할 것을 규정하고 있으며, 차량의 기밀도 τ 도 18 sec 이하가 될 것을 규정하고 있다.

한편, 경부고속선 건설 당시 (사)대한터널협회에서 규정한 승객 이명감 기준은 3초간 최대압력변동이 단독주행 시 800 Pa, 복선 터널에서 열차가 교행하는 상황에서는 1250 Pa 이하가 되도록 규정하고 있다. 이는 국가기준인 철도차량 안전기준에 관한 지침에 비해 3초간의 압력변동만을 규정하고 있으며, 교행의 경우 압력변동 허용치를 3초간 1250 Pa로 더 크게 함으로써 결과적으로 보다 완화된 규정으로 작용한다.

<표 2-4-4 승객 이명감에 대한 국내 기준>

기준	주행 속도 (km/h)	차량 기밀도	기준
Guide for safety standard of Rolling stock	200 이상	기밀 차량 (차량 기밀도 18s 이상)	- 500 Pa/1 s - 800 Pa/3 s - 1,000 Pa/10 s - 2,000 Pa/60 s
Special criteria for KTX -Kyeongbu line	300	기밀 차량 (차량 기밀도 11s 이상)	○ 단독주행 - 800 Pa/3 sec ○ 복선 교행 - 1,250 Pa/3 sec

유동 해석을 통하여 열차가 터널을 통과할 때 터널 내부의 압력 변동을 계산하고, 계산된 터널 내 압력 중 열차 위치에 해당하는 지점의 압력을 이용하여 열차 외부 압력 변동을 추출하였다.

열차 내부 압력의 계산을 위해 열차의 동적 기밀계수의 정의에 따른 식을 차분하여 아래의 식과 같이 계산하였다.

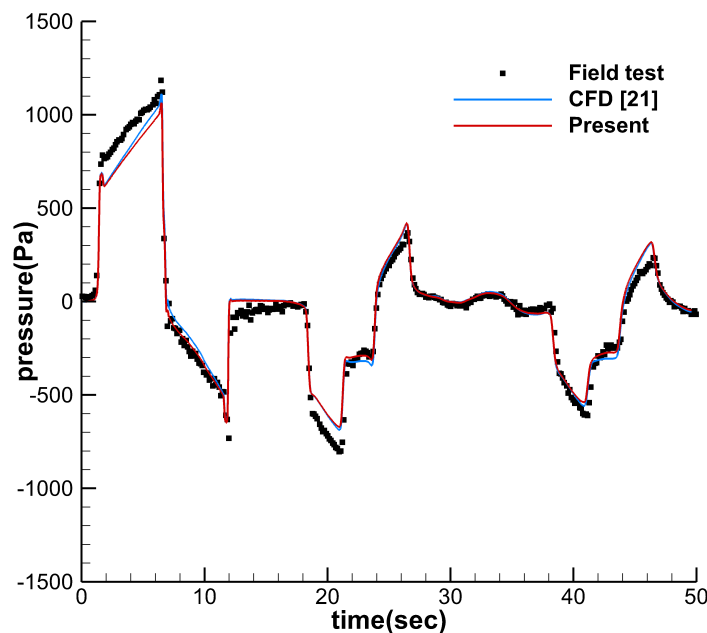
$$P_{int}^{n+1} = \frac{\Delta t}{\tau_{dyn}} (P_{ext}^n - P_{int}^n)$$

위 식에서 P_{ext} 는 객실 외부 압력, P_{int} 는 객실 내부 압력이며, 위첨자 n 은 반복계산 횟수를 의미한다. 또한, τ_{dyn} 는 열차의 동적 기밀 계수이며, 본 연구에서는 KTX-산천 열차의 사양에 해당하는 18 sec를 적용하였다.

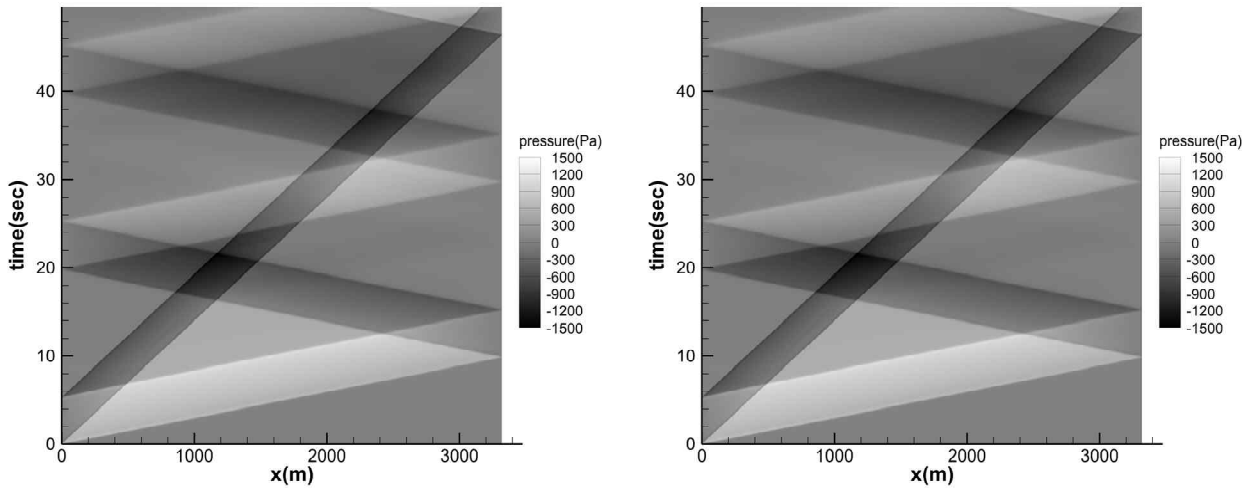
라. 검증 목표 및 평가

시간에 따른 터널 벽면에서의 압력 변동을 그림과 같이 나타내었다. 그림에서 명암의 대비로 인해 보이는 선들은 압력파와 열차 전두부 및 후미부 근방의 압력 변동을 의미하며, 선들의 기울기는 각각 압력파와 열차의 속도를 의미한다. 보다 급한 기울기로 나타나는 압력파는 열차 전두부의 터널 진입과 열차 후미부의 터널 진입 시 각각 발생하는 압축파와 팽창파 및 형성된 두 파들이 이후 터널 출구에서 반복하여 나타나는 압력 파들로 이루어진다.

x-t 선도 상에서 일정 지점에서의 압력을 추출하면 해당 위치에서의 터널 내 압력변동이 되는데, 현장시험 조건과 동일한 터널 입구로부터 470m에서 측정된 압력 및 전산 해석을 통해 계산된 압력을 그림에 비교하여 나타내었다. 그림에서 측정값과 해석값 간에 압력의 상승과 하강 시점이 정확하게 일치하며, 압력값들 또한 전반적으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 기존 프로그램과 마찬가지로, 열차가 터널에 진입하면서 발생하는 압력파 및 반사파들의 상호작용을 정확하게 해석하고 있다. 무격자 유동해석 프로그램의 해석 결과와 실험 측정치의 평균 오차는 3.6%로, 유한체적법 및 정렬격자계를 사용한 기존 연구 (평균 오차 3.4%) 대비 정확도 90%로 설정했던 과제 목표를 만족하고 있다.



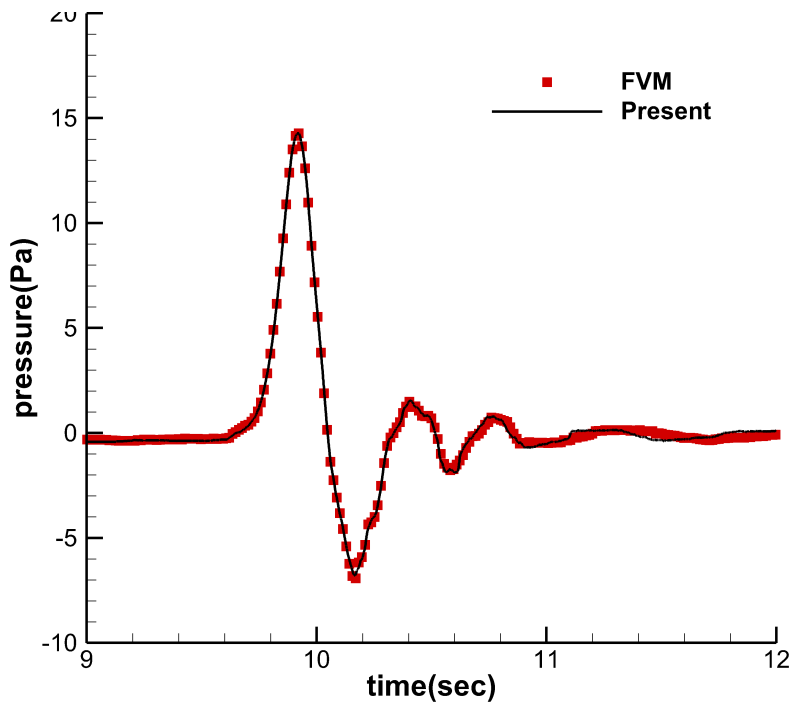
<그림 2-4-10 검증 케이스의 압력 변동 이력 (470m)>



<그림 2-4-11 검증 케이스의 x-t 선도 비교>

(좌 : 무격자 기법, 우 : 유한체적법)

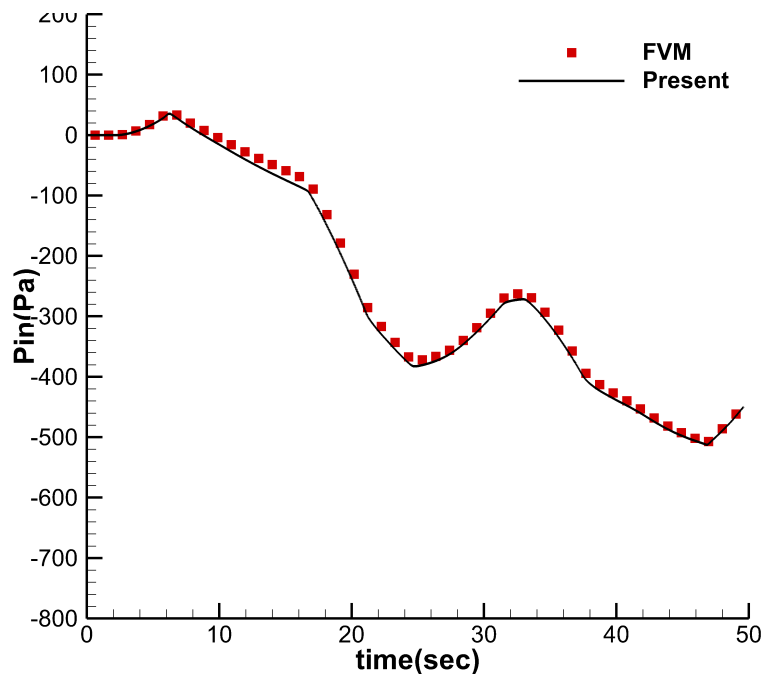
열차 전두부가 터널입구에 진입하면서 생성된 최초 압축파가 터널 출구로부터 20m 지점에 도달하는 것을 측정한 미기압파 세기를 비교하였다. 미기압파는 철도기술연구원의 압력 변동 시험에서 측정된 자료가 없으므로 기존의 수치해석 활용 연구인 유한체적법 프로그램 해석 결과와 비교하였다.



<그림 2-4-12 검증 케이스의 미기압파 측정 결과 비교>

본 연구에서 개발된 무격자 유동해석 프로그램의 미기압과 해석 결과와 기존 연구의 해석 결과 간의 상대오차는 4.02%로, 본 연구의 목표로 설정했던 기존 프로그램 대비 정확도 90%를 만족하고 있다.

유동 해석 결과로 얻어진 터널 내부 압력 변동으로부터 차량 기밀도에 따라 차량 내부 압력 변동을 차분하여 계산한 승객 이명감 해석 결과를 비교하였다. 터널 내부의 압력이 압력과 및 팽창파로 인해 급격히 변동함에 따라 객실 내부에서 체감되는 압력 변동 또한 발생하게 되는데, KTX-산천 열차의 진행 방향 기준으로 가장 후미에 위치하는 8번째 객실에서 압력 변동이 가장 크게 나타났으며, 객실 내 압력 변동 해석 결과를 그림 47과 같이 나타내었다. 기존 프로그램의 결과와 본 연구에서 개발한 무격자 기반 해석 프로그램의 결과가 잘 일치하고 있으며, 상대오차는 1.59%로 나타나 본 연구의 목표로 설정한 기존 프로그램 대비 정확도 90%를 만족한다.



<그림 2-4-13 김중 케이스의 승객이명감 해석 결과 비교>

본 연구에서 검증 케이스로 선정한 KTX-산천 열차의 경부고속선 복안터널 통과에 대해 x-t선도, 470m 지점에서의 압력 변동 이력, 터널 출구로부터 20m 지점에서 측정된 미기압과 세기, 객실에서의 내부 압력 변동 해석 결과를 기존의 유한체적법 해석 프로그램 결과와 비교하였다. 각각의 검증 항목에 대해 기존 프로그램과 무격자 해석 프로그램의 상대 오차를 표로 나타내었다. 검증 항목 중 상대오차가 가장 큰 항목은 4.02%(미기압과)로, 모든 검증 항목이 과제 목표인 정확도 90%를 만족함으로써 본 연구에서 개발한 무격자 기반 유동 해석 프로그램을 검증하였다.

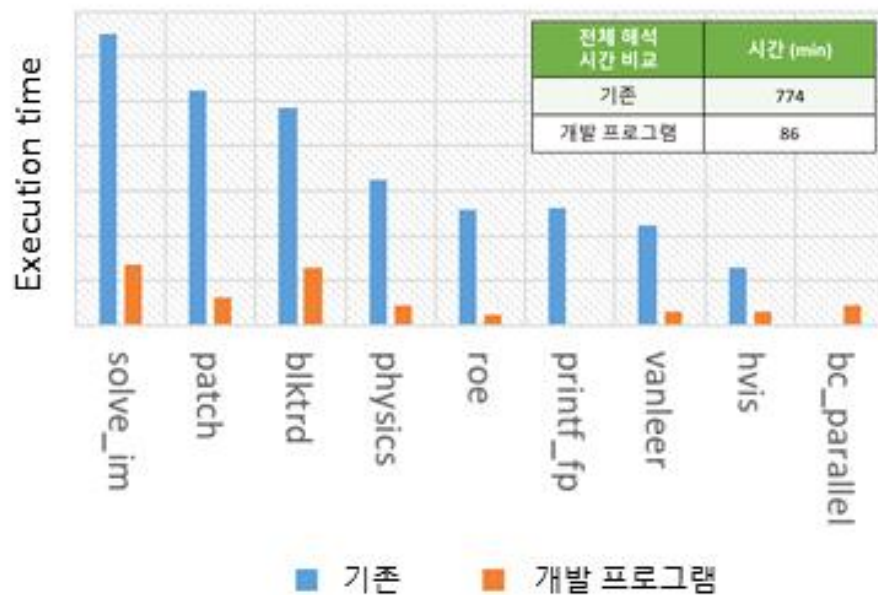
<표 2-4-5 개발 프로그램의 터널 공기력 해석 정확도>

검증 항목	기존 프로그램(C-STA)과의 차이
터널 내 압력 변동 이력 (x-t선도 전체)	0.2%
터널 입구로부터 470m 지점에서의 압력 변동	3.6%
승객 이명감	1.6%
미기압파	4.0%

마. 기존 프로그램과의 비교

1) 해석 시간

본 연구에서 개발된 해석 프로그램은 병렬 프로세서를 구비한 컴퓨터 하드웨어에서도 동작할 수 있도록 OpenMPI 병렬 처리 라이브러리를 적용하였다. 따라서, 기존에 사용하던 serial 프로그램 대비하여 해석에 사용되는 CPU 코어수에 비례하여 해석 시간이 단축 될 수 있다. 아래 그림과 같은 예의 경우 각 서브루틴별로 실행시간이 단축되어 전체 적으로 89%가량의 계산시간 저감 효과가 나타날 수 있음을 알 수 있다.



<그림 2-4-14 개발 프로그램의 서브루틴별/전체 해석 시간 비교>

2) 사용자 편의성/분석 효율성

본 개발 프로그램은 아래와 같은 항목들의 사용자 편의성 개선을 통해 기존 대비 설계도구로서 분석 효율성을 증대시켰다.

- Graphic user interface 채용 : 형상 모델러를 통해서 생성된 형상의 즉각적인 확인이 가능하며 그래프 출력 기능 탑재를 통하여 해석 결과를 바로 확인 할 수 있음
- 해석 케이스/프로젝트 매니저 채용 : 해석 케이스의 생성 및 수정이 편리하여 대량의 parametric study 구성에 효율적이며, 프로젝트의 각 케이스에 대한 정보를 스프레드시트 형태로 확인할 수 있어 각 케이스별 비교가 용이함
- 주요 도표의 자동 생성 : x-t diagram, 미기압과 등 고속열차 해석결과 분석시 필수적인 결과들의 자동 생성을 통하여 반복적인 사용자 작업을 줄임으로써 분석 효율성을 향상시킴

5. 소결

본 연구에서는 압축기 적용 고속열차 전용으로 개발된 CFD 해석 프로그램에 대해 그래픽 유저 인터페이스를 구성하여, 고속열차에 대한 다양한 해석을 용이하게 수행할 수 있는 사용자 환경을 구성하였다. 또한 개발된 프로그램 및 사용자 환경에 대한 검증 해석을 수행하였으며, 압축기 적용 고속열차에 대한 실증해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- PyGTK 기반의 그래픽 유저 인터페이스를 개발하여 고속열차 해석에 특화된 윈도우를 구성하였으며, 해석에 관련된 그래픽 객체 및 해석 결과를 GUI 상에서 가시화 및 확인할 수 있는 사용자 환경을 마련하였다.
- 고속열차 해석 과정에서 생성되는 형상곡선, 해석용 질점계, 유동 해석 결과(x-t선도, 압력 변동 이력, 미기압과 등)를 GUI 상에서 확인할 수 있으며, 외부 프로그램으로 paraview를 연동할 수 있도록 스크립트를 실행할 수 있는 사용자 전후처리 환경을 구성하였다.
- 개발된 프로그램 및 사용자 인터페이스에 대한 검증으로써 KTX 열차의 복안터널 통과 문제를 해석하였으며, 해석 정확도 검토 결과 승객 이명감 1.6%, 미기압과 4.0% 등 모든 검증 항목에서 기존 프로그램(C-STA) 대비 96% 이상의 정확도를 나타냄을 확인하였다.
- 검증된 프로그램으로 압축기 적용 시의 공기력 저감 효과에 대한 실증 해석을 수행하여, 본 과제에서 제시하였던 미기압과와 승객이명감 등의 개선 효과가 나타날 수 있음을 입증하였다.

제 5 절 하이퍼루프형 압축기 적용 고속열차 공기역학 상세설계

1. 개요

본 절에서는 압축기 적용 고속열차의 터널 공기력 저감효과를 평가하기 위하여 비정상 축대칭 및 3차원 Navier-Stokes 방정식을 이용한 전산시뮬레이션을 수행하였다. 축대칭 해석에는 개발 프로그램이, 3차원 해석에는 ANSYS Fluent 2019R3이 사용되었다.

먼저, 2절에서 제시한 3개의 설계개념 후보에 대해 각각 전산유체 시뮬레이션을 수행하여 설계개념 후보들의 터널 공기력 저감 효과를 비교하여 최종 설계개념을 선정하였다. 또한, 선정된 최종 설계개념에 대하여 압축기 흡입구 및 배기구 단면적, 터널 길이, 열차 속도를 달리하여 파라메타 연구를 수행하였으며, 수행 결과를 통해 압축기의 터널 공기력 저감에 미치는 파라메타의 영향을 정량적으로 분석하였으며, 이를 통해 가장 효과적인 성능을 갖는 최종 설계안을 제시하였다. 마지막으로 열차의 3차원 형상에 대한 비정상 해석을 실시하여 압축기 적용 고속열차의 터널 공기력 저감 효과를 검증하였다.

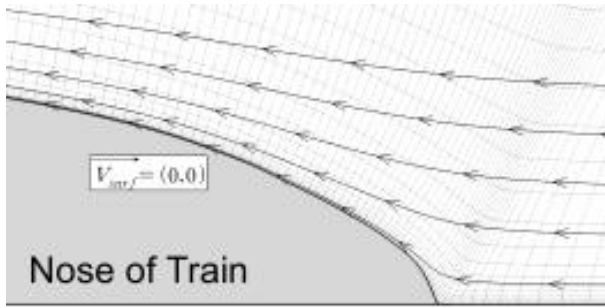
2. 해석 조건

가. 축대칭 해석 모델

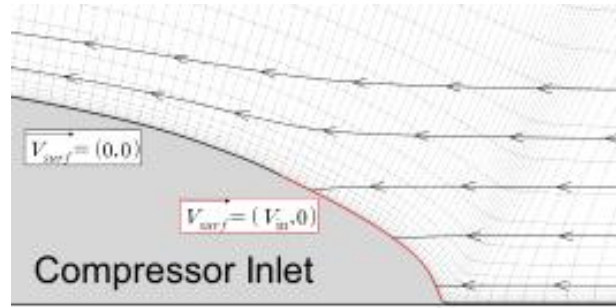
해석에 사용된 열차는 KTX-산천 열차로서 열차 길이는 201.3 m이며, 최대 단면적은 10.008 m^2 , 차체 기밀도는 18 sec이다. 열차의 최고 운영속도는 300 km/h 이며, 속도 증가에 따른 터널 공기력 증가 영향을 살펴보기 위하여 400km/h의 속도에 대해서도 해석을 수행하였다. 터널의 경우, 축대칭 모델에서는 터널의 단면 형상이 등가의 단면적을 갖는 원으로 표현되기 때문에 보다 단면적이 작은 호남경부선 터널의 96.7 m^2 를 적용하였으며, 3차원 해석의 경우에는 터널의 2차원 단면 형상을 이용하여 3차원 터널 모델을 작성하였다. 또한, 터널 길이에 따른 터널 공기력 저감 효과를 살펴보기 위하여 1km, 2km, 3km, 4km 및 5km의 5가지 터널 길이를 적용하였다.

열차에 부착된 압축기를 모사하기 위하여 압축기 입구 및 출구에서는 해당 셀에서의 유동 방향을 x축 방향으로 고정하고 축방향 속도성분 u 를 압축기 조건에 따라 부여한 다음 나머지 유동변수들을 계산하여 경계조건으로 부여하였다(그림 2-5-1). 압축기 적용 시 유입구와 유출구의 면적은 동일하게 적용하였으며 열차 단면적의 10%, 20% 및 30%까지 변화시켜가며 해석을 수행하였다.

표 2-5-1에는 설계개념과 흡입/배기구 면적 및 터널 길이 등을 달리하여 도출된 축대칭 해석의 해석 모델을 나타내고 있다. 모든 해석 모델에 대하여 열차의 속도는 300km/h, 350km/h 및 400km/h의 세 가지 속도로 계산을 수행하여 열차속도의 영향도 고려하여 분석을 수행하였다.



(a) 압축기 미적용



(b) 압축기 적용

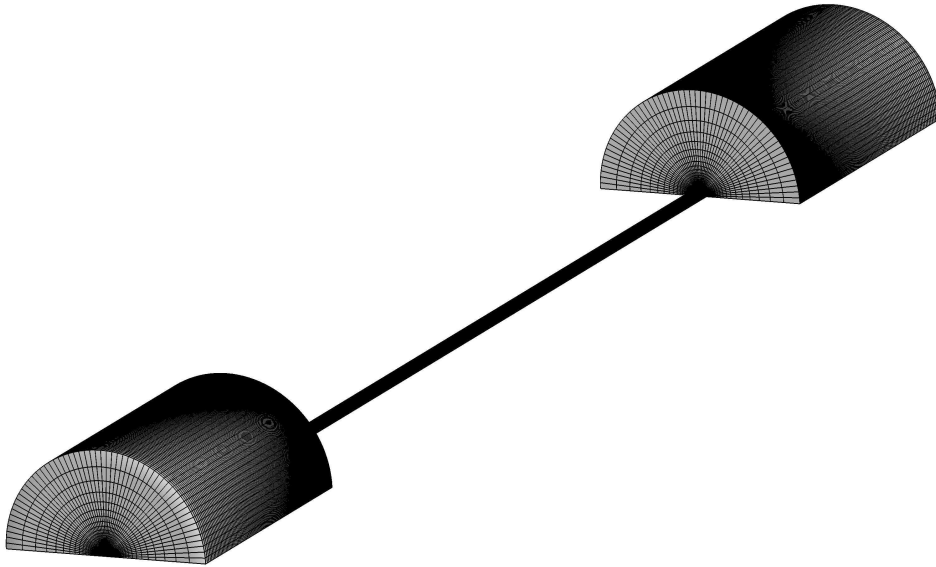
<그림 2-5-1 압축기 적용 여부에 따른 전두부 흡입구 경계조건>

<표 2-5-1 축대칭 해석 모델>

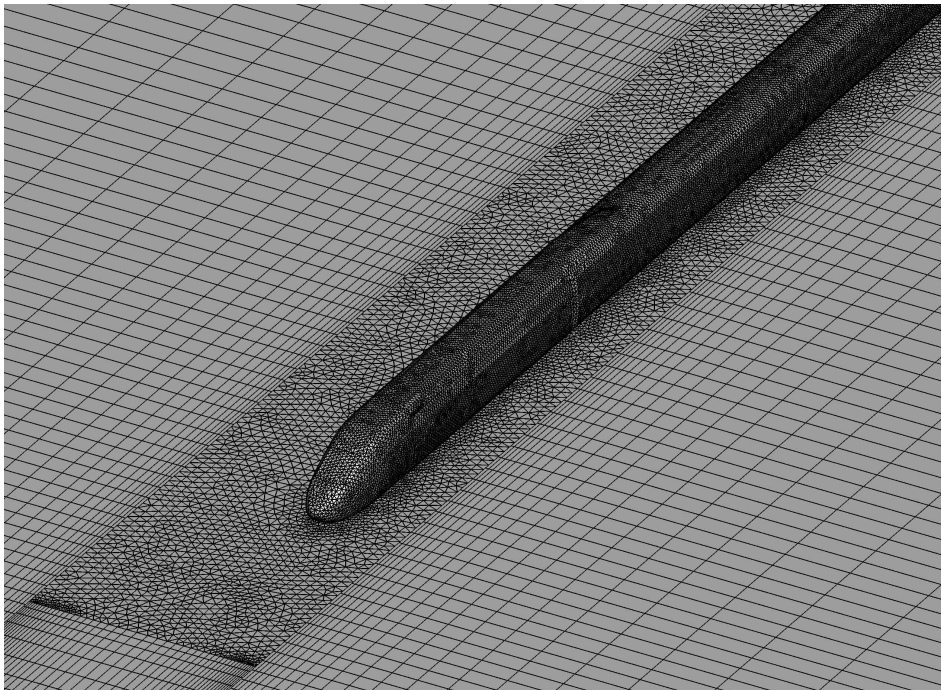
model name	설계개념	흡입/배기구 면적	터널 길이
V201-T201	압축기 미적용	N/A	1 km
V211-T201	설계개념 1	10 %	1 km
V212-T201	설계개념 1	20 %	1 km
V213-T201	설계개념 1	30 %	1 km
V223-T201	설계개념 2	30 %	1 km
V233-T201	설계개념 3	30 %	1 km
V201-T202	압축기 미적용	N/A	2 km
V211-T202	설계개념 1	10 %	2 km
V212-T202	설계개념 1	20 %	2 km
V213-T202	설계개념 1	30 %	2 km
V201-T203	압축기 미적용	N/A	3 km
V211-T203	설계개념 1	10 %	3 km
V212-T203	설계개념 1	20 %	3 km
V213-T203	설계개념 1	30 %	3 km
V201-T204	압축기 미적용	N/A	4 km
V211-T204	설계개념 1	10 %	4 km
V212-T204	설계개념 1	20 %	4 km
V213-T204	설계개념 1	30 %	4 km
V201-T205	압축기 미적용	N/A	5 km
V211-T205	설계개념 1	10 %	5 km
V212-T205	설계개념 1	20 %	5 km
V213-T205	설계개념 1	30 %	5 km

나. 3차원 해석 모델

3차원 해석은 축대칭 해석과 마찬가지로 KTX-산천 열차와 1km 길이의 호남선 터널에 대해 해석이 수행되었다. 열차의 속도는 300km/h와 400km/h로 설정하였으며, 압축기는 설계개념 1에 대해 20%의 입, 출구 면적이 적용되었다. 아래 그림 2-5-2와 2-5-3에는 각각 3차원 해석을 위한 해석 영역 및 열차 주위 격자계가 나타나 있다.



<그림 2-5-2 3차원 해석 영역>



<그림 2-5-3 열차 주위 격자>

3. 측대칭 해석 결과

가. 설계개념 별 비교분석

설계개념 별 터널 공기력 변화를 비교하기 위하여 열차속도 400km/h, 터널길이 1km에서 각 설계개념 별 터널 공기력 해석 결과를 비교분석하여 그림 2-5-4에서 그림 2-5-8에 나타내었다.

아래 그림 2-5-4에는 고속열차가 터널 진입 후 3초가 지난 시점에서의 전두부 주위 압력 분포를 각 설계개념 별로 나타내고 있다. 먼저, 압축기가 적용되지 않은 그림 2-5-4 (a)의 경우를 살펴보면, 전두부 근방에서 높은 압력분포가 나타남을 알 수 있는데, 전두부 끝단의 압력은 최대 5,370 Pa로 크게 나타난다. 설계개념 1을 적용한 그림 2-5-4 (b)를 살펴보면, 흡입구에서의 압력은 크게 감소하고 흡입구 바로 근방에서 다소 높은 압력분포를 나타내고 있으나, 고압의 영역은 미적용시에 비해 크게 줄어들었음을 알 수 있다. 설계개념 1을 적용하였을 때 전두부 근방 압력의 최대값은 4,194 Pa로서 미적용시의 78.1 %로 크게 줄어들었음을 알 수 있다. 전두부 흡입 후 첫 번째 차량 끝단 근처에서 배출하는 설계개념 2가 나타난 그림 2-5-4 (c)를 살펴보면, 설계개념 1에 비해 전두부 주위 고압 영역이 다소 커졌으며, 최대압력이 5,096 Pa(미적용시의 94.9%)로서 압력 저감 효과가 설계개념 1에 비해 다소 낮은 것으로 나타났다. 마지막으로 그림 3-5-4 (d)에 나타난 설계개념 3의 경우에는 압축기 미적용시에 비해서는 전두부 주위 압력이 최대 5,295 Pa(미적용시의 98.6 %)로 다소 감소하였으나, 전두부에서 공기의 흡입이 이루어지지 않으므로 설계개념 1과 설계개념 2에 비해서는 높은 압력분포를 나타내고 있다.

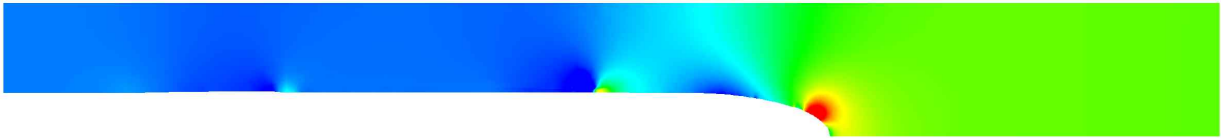
pressure(Pa): 0 1000 2000 3000 4000



(a) 압축기 미적용 시



(b) 압축기 설계개념 1(열차 단수 압축기형)



(c) 압축기 설계개념 2(선두차 단수 압축기형)

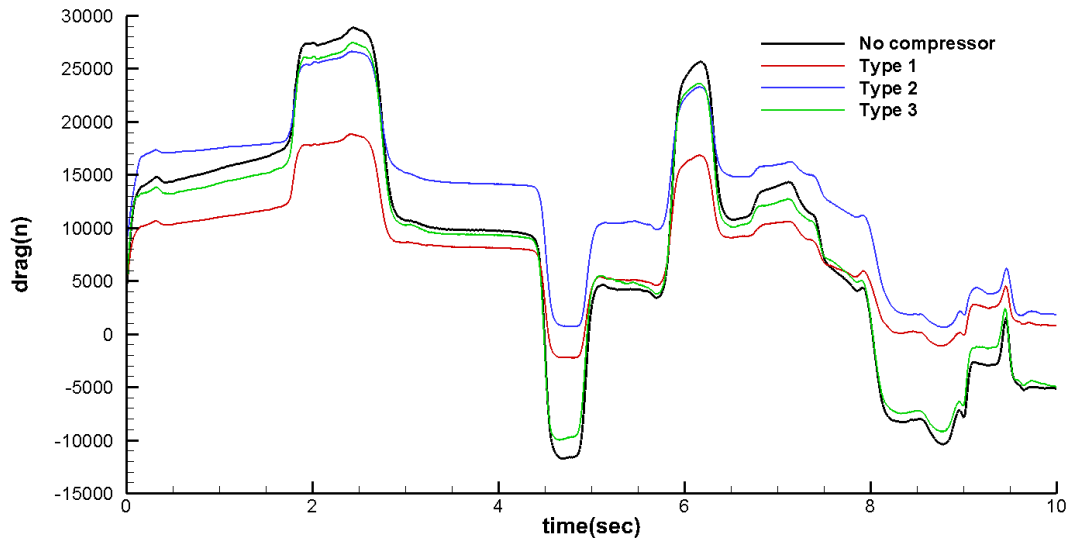


(d) 압축기 설계개념 3(압축기 외부장착형)

<그림 2-5-4 설계개념 별 선두부 주위 압력 분포(터널 진입 후 3초)>

그림 2-5-5에는 열차가 터널을 통과하는 동안의 공기저항 변화를 각 설계개념 별로 나타내고 있다. 먼저, 압축기가 적용되지 않은 경우(—)를 살펴보면, 열차 선두부의 터널 진입 직후($t=0$ sec) 열차 전방에서 발생한 압력파의 영향으로 공기저항이 급격히 증가하며, 이후 공기저항은 서서히 증가하다가 열차 후미부가 터널로 진입하는 시점($t=1.8$ sec)에서 발생하는 팽창파의 영향으로 공기저항이 급격히 상승하다가 이 팽창파가 열차 선두부를 지나는 약 2.7초에서는 급격히 감소한다. 이후 공기저항은 완만하게 감소하다가 진입 시 발생한 압축파와 팽창파가 터널 출구에서 반사되어 열차와 만나는 시점인 4.5초 및 5초 근방에서 크게 감소하였다가 다시 증가한다. 이후에도 압력파가 터널 내로 전파하다가 열차와 만나는 시점들에서 공기저항이 급격히 증감하는 것을 알 수 있으며, 시간이 지날수록 압력파가 열차에 반사되어 작은 파들로 나누어지기 때문에 공기저항의 변화가 다소 복잡하게 나타남을 알 수 있다.

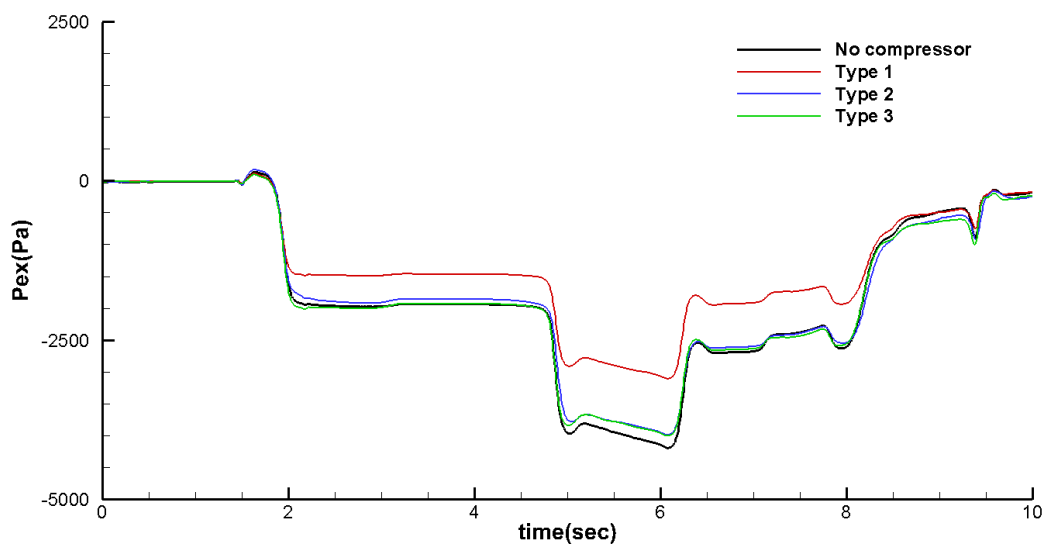
설계개념 1(—)의 경우에는 터널 진입 직후부터 진입 압축파가 터널 출구에서 반사되어 팽창파로 돌아와 열차와 만나는 시점에 해당하는 4.5초까지는 미적용 열차에 비해 상당히 낮은 공기저항값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 반사 팽창파와 압축파가 통과하는 시점 사이인 4.5초에서 5초, 그리고 8초 이후 일부 구간에서는 공기저항이 다소 증가할 경우도 있었으나 전반적으로 압축기 미적용인 경우보다 낮은 공기저항을 나타내고 있었다. 설계개념 2(—)는 열차의 터널 진입 이후 거의 모든 시점에서 압축기 미적용시보다 공기저항이 크게 나타났다. 설계개념 3(—)은 열차의 터널 진입 이후 설계개념 1과 비슷한 값을 나타내다가, 열차가 완전히 터널에 진입한 시점($t=1.7$ sec) 이후 설계개념 1보다는 높으나 미적용 시에 비해서는 낮은 값을 나타내고 있으며, 이후에는 설계개념 1에 비해 대체로 낮은 값을 나타내고 있다.



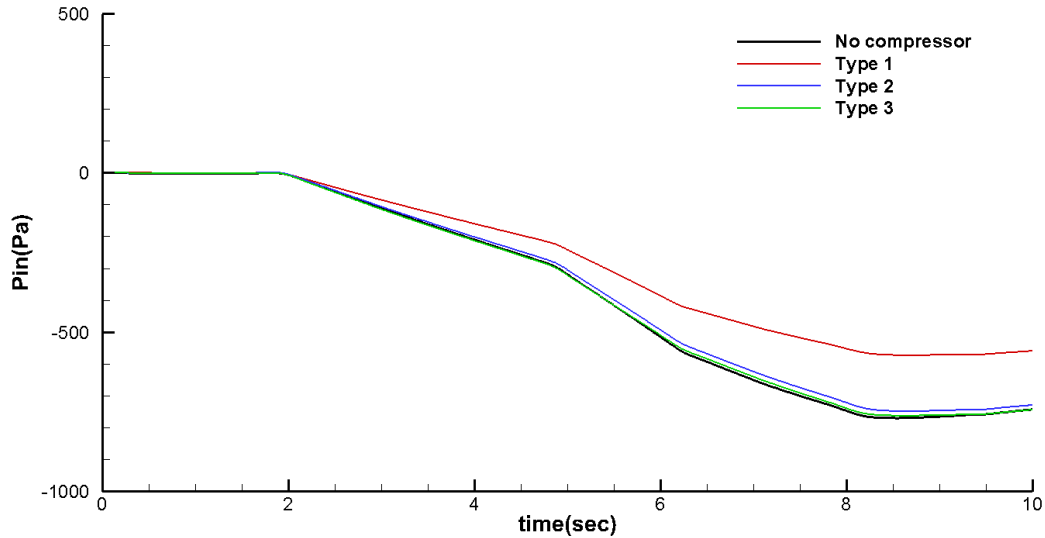
<그림 2-5-5 설계개념 별 공기저항 변화>

승객의 이명감에 영향을 미치는 열차 내외부 압력 변화를 그림 2-5-6에 나타내었다. 먼저, 그림 2-5-6 (a)에 나타난 외부압력 변화는 압축기 미적용 시(—)에 비하여 설계개념 1 (—)이 현저하게 낮게 나타나고 있음을 알 수 있고, 설계개념 2(—)과 설계개념 3(—)은 압축기 미적용 시에 비해 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

그림 2-5-6 (b)에는 이상의 외부압력 변화에 대해 열차의 기밀도를 18 sec로 적용하여 계산된 내부압력 변화가 나타나 있으며, 외부압력 변화와 마찬가지로 설계개념 1의 내부압력 변화가 크게 줄어들었음을 알 수 있으며, 설계개념 2와 설계개념 3에서는 압축기 미적용 시에 비해 큰 변화가 없음을 알 수 있다.



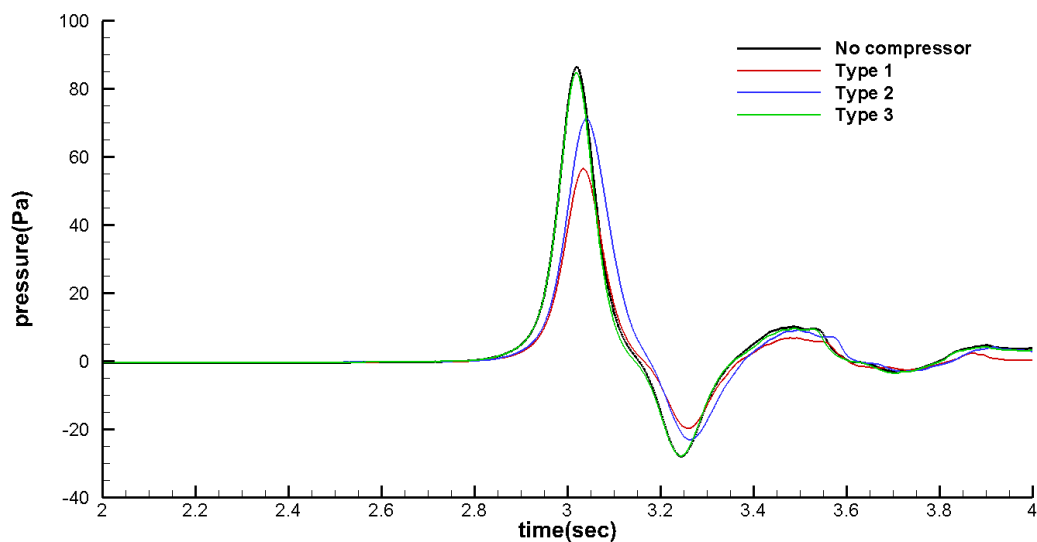
(a) 외부 압력



(b) 내부 압력

<그림 2-5-6 설계개념 별 열차 내외부 압력 변화(1번째 객차)>

그림 2-5-7에는 터널 출구에서 방사되는 미기압파의 강도를 측정하기 위하여 터널 출구에서 20m 떨어진 지점에서 측정된 시간에 따른 압력 변화를 나타내고 있다. 압력파가 터널을 음속으로 일주하는 시간인 2.95 sec에 해당하는 3 sec 직후에 펄스파 형태의 미기압파가 관찰됨을 알 수 있으며, 압축기가 적용되지 않은 경우(—)에 비하여 설계개념 1(—)은 미기압파의 크기가 현저히 줄어들었음을 알 수 있다. 설계개념 2(—)도 전두부의 유동 흡입에 의해 미기압파의 크기가 다소 줄어들었음을 알 수 있으며, 전두부가 아닌 선두차 끝단에 압축기가 적용된 설계개념 3(—)의 경우에는 미기압파의 저감 효과가 거의 미미함을 알 수 있다.



<그림 2-5-7 설계개념 별 터널 출구 미기압파>

아래 표 2-5-2에는 각 설계개념의 터널 공기력 저감 효과를 비교하여 나타내었다. 먼저, 터널을 통과하는 동안의 평균 공기저항의 경우에는 압축기 미적용시 7,403 N에 비해 설계개념 1과 설계개념 3은 각각 3.3 %, 3.7 % 감소한 7,163 N과 7,134 N을 나타내었다. 반면, 설계개념 2의 경우에는 61.6% 증가한 11,966.5 N으로 설계개념 2는 공기저항 저감 측면에서는 매우 불리한 것으로 나타났다. 객실 내 압력변동의 경우 설계개념 1이 미적용 시에 비해 25.6 % ~ 27.1 % 감소한 것으로 나타나 가장 효과적인 것으로 나타났고, 설계개념 2와 설계개념 3의 경우에는 전반적으로 감소했으나 5.1 % 이내의 저감율을 보였다. 마지막으로 미기압파의 경우에는 설계개념 1이 56.51 Pa 로 미적용 시에 비해 34.6 %의 저감율을 보였으며, 설계개념 2의 경우에는 17.67 %의 저감율을, 설계개념 3은 2.1 %의 미미한 저감율을 나타내었다.

이상과 같이 설계개념 별 터널 공기력 저감 효과를 비교한 결과, 설계개념 1은 공기저항과 객실 내 압력 변동 및 미기압파 등 모든 터널 공기력의 저감이 가능한 것으로 나타났으며 저감율도 가장 높게 나타났다. 설계개념 2는 공기저항은 크게 증가하고, 객실 내 압력 변동 및 미기압파의 저감은 미미한 것으로 나타났으며, 설계개념 3은 공기저항의 저감에는 설계개념 1과 대등한 정도로 효과적이었으나, 객실 내 압력 변동과 미기압파의 저감은 설계개념 2와 유사하게 미미하게 나타났다.

따라서, 최종 설계개념으로 설계개념 1을 선정하여 터널 공기력 저감 효과를 살펴보았다.

<표 2-5-2 설계개념 별 터널 공기력 저감 효과>

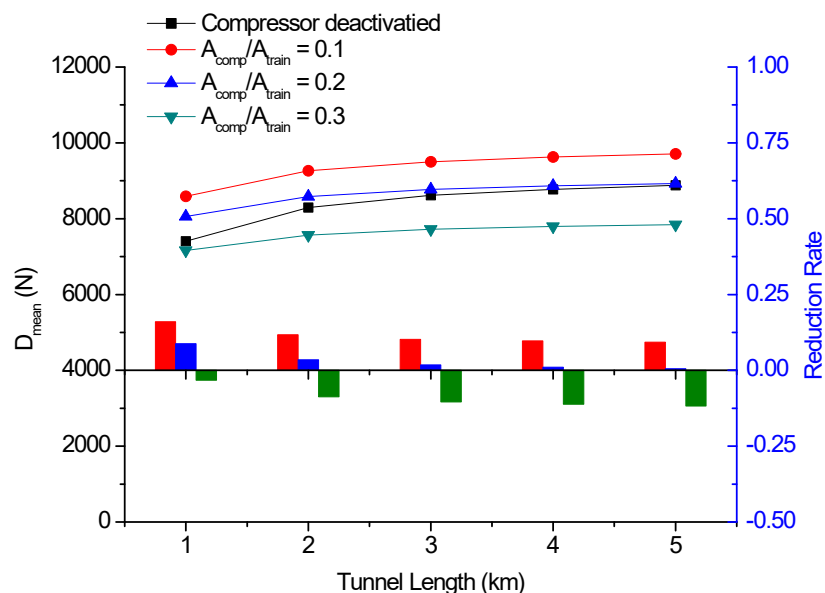
압축기 설계개념		미적용	설계개념 1	설계개념 2	설계개념 3
case name		V201-T201 _S400	V201-T213 _S400	V201-T223 _S400	V201-T233 _S400
평균 공기저항		7,403.1N	7162.9 N (96.7 %)	11966.5 N (161.6 %)	7134.5 N (96.3 %)
단위시간 당 압력변동	$\Delta t = 1 \text{ sec}$	198.31 Pa	144.75 Pa (73.0 %)	189.92 Pa (95.8 %)	188.17 Pa (94.9 %)
	$\Delta t = 3 \text{ sec}$	443.08 Pa	323.01 Pa (72.9 %)	427.86 Pa (96.6 %)	431.29 Pa (97.3 %)
	$\Delta t = 10 \text{ sec}$	770.18 Pa	573.36 Pa (74.4 %)	749.7 Pa (97.3 %)	763.07 Pa (99.1 %)
미기압파		86.43 Pa	56.51 Pa (65.4 %)	71.16 Pa (82.33 %)	84.62 Pa (97.9 %)

라. 해석 파라메타 별 터널 공기력 저감 효과

선정된 설계개념 1에 대해서 압축기 적용에 따른 터널 공기력의 저감은 입출구 면적과 같은 압축기의 설계와 함께 터널 길이, 열차 속도 등 운행조건에 따라서도 달라질 수 있다. 본 연구에서는 압축기 입출구 면적과 터널 길이를 바꾸어가며 해석을 수행하여 해석 파라메타에 따른 터널 공기력 저감 효과를 살펴보았다.

먼저, 그림 2-5-8에는 압축기 흡배기구 면적과 터널 길이에 따른 터널 통과 시 평균 공기저항을 나타내었다. 터널 길이가 1km 일 경우에는 평균 공기저항이 다소 작게 나타났지만, 압력파의 영향이 비교적 적은 2km 이상의 터널에서는 평균 공기저항이 터널길이에 따라 완만하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 압축기 미적용 시(—■—)에 비해 입출구 단면적이 열차 단면적의 10%일 경우(—●—)에는 열차 공기저항이 오히려 증가하였으며, 입출구 단면적 20%(—▲—)에서는 증가율이 다소 감소하였으며, 흡배기구 단면적이 열차 단면적의 30%로 설정된 경우(—▼—)에서는 터널 길이 1km에서는 공기저항 저감률이 3.2 % 가량으로 다소 작으나, 터널 길이 2km 이상에서는 8.7 %에서 11.7 %까지 감소하는 것으로 나타났다.

개활지에서의 주행에서는 축대칭으로 단순화된 열차의 형상은 실제 3차원 형상에 비해 작은 공기저항을 경험하는 것이 일반적이다. 하지만, 터널을 통과하는 동안 발생하는 공기저항의 증가는 압력파의 발생 등 공기의 압축성 효과에 기인하기 때문에 본 축대칭 해석의 결과를 통해 제시된 공기저항 저감 효과는 실제 3차원 열차에서도 유사하게 작동할 것으로 기대된다.



<그림 2-5-8 해석 파라메타에 따른 평균 공기저항>

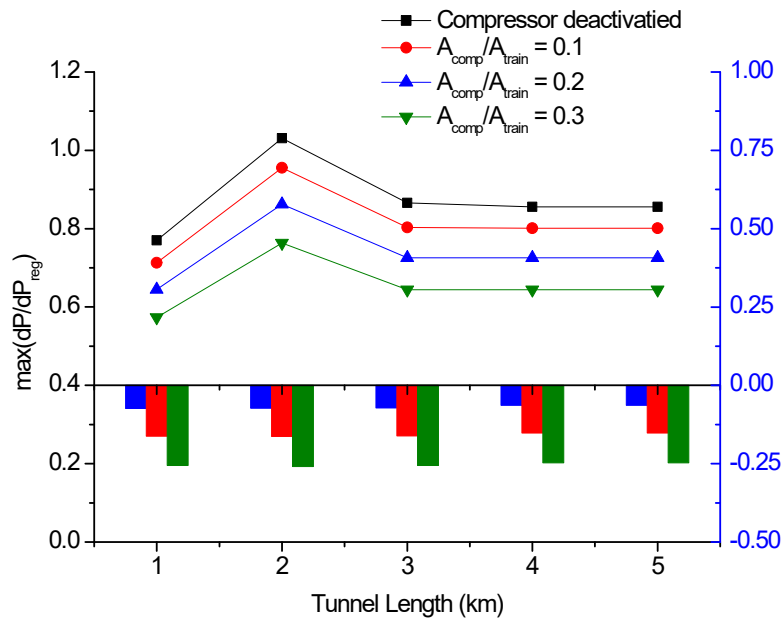
그림 2-5-9에는 해석 파라메타에 따른 객실 내 압력변동의 효과를 살펴보았다. 객실 내

압력 변동은 단위 시간 당 압력변동으로 평가하는 것이 일반적이나 단위시간이 1초, 3초, 10초 및 60초로 여러 개이기 때문에 파라메타 변화에 따른 압력변동의 저감 성능을 평가하기에는 불편한 점이 많다. 따라서, 본 연구에서는 아래와 같이 객실 내 압력변동을 평가할 수 있는 승객이명감 지표 $\max(dP/dP_{reg})$ 를 아래 식 (2-5-1)과 같이 정의하여 분석에 활용하였다.

$$\max(dP/dP_{reg}) = \max\left(\frac{dP_i}{dP_{i,reg}}\right) \quad (2-5-1)$$

위 식에서 dP_i 는 객실 내 1초, 3초, 10초 및 60초 간 최대(peak-to-peak) 압력변동을 의미하며, $dP_{i,reg}$ 는 EN 및 국내 규격에서 규정하고 있는 1초, 3초 10초 및 60초 간 최대 압력변동 기준치로서 각각 500Pa, 800Pa, 1000Pa 및 2000Pa의 값을 갖는다. 참고로, 본 지표가 1을 초과할 경우 객실 내 압력변동 기준을 만족하지 못하는 것을 의미한다.

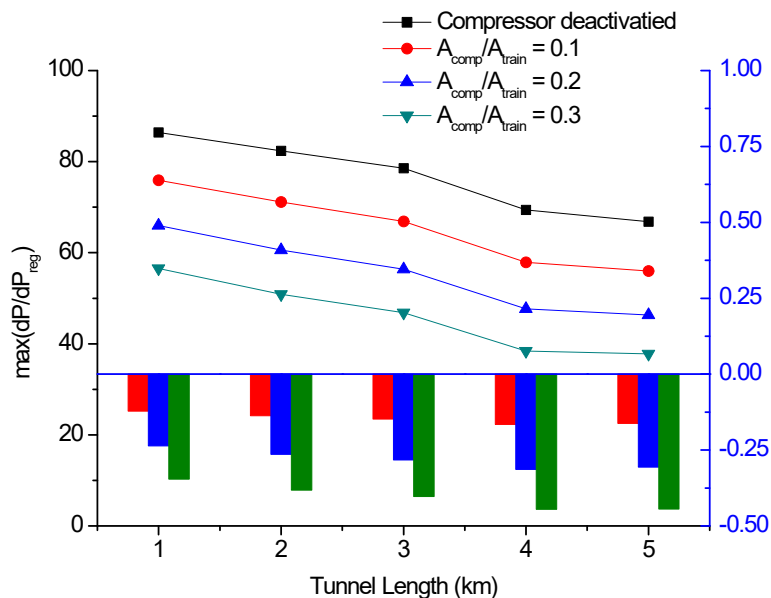
아래 그림 2-5-10에서 터널 길이가 2km에서 실내 압력변동이 가장 크게 나타나고 있으며, 3km 이후에는 터널 길이와 상관없이 일정한 실내 압력변동을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 압축기 흡배기구 단면적의 변화의 효과를 살펴보면, 흡배기구 단면적이 클수록 실내 압력변동이 줄어들고 있음을 알 수 있으며, 압축기 단면적 30%에서 최소 24.7 %, 최대 25.9 %의 객실 내 압력변동 저감 효과를 보여주고 있다.



<그림 2-5-9 해석 파라메타에 따른 승객이명감 지표>

그림 2-5-10에는 해석 파라메타에 따른 미기압과 저감 효과를 살펴보았다. 압축기 적용

여부와 관계없이 미기압과의 크기는 터널 길이에 따라 다소 감소하고 있음을 알 수 있는데, 이는 터널 내 케도가 자갈인 경우의 특성에 해당한다. 미기압과 역시 압축기 면적이 증가할수록 저감 효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있는데, 10%의 압축기 면적으로도 12.2 %에서 16.2%의 저감 효과를 거둘 수 있으며, 30%의 압축기 면적을 적용할 경우 34.6%에서 44.4% 까지 미기압과의 저감효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.



<그림 2-5-10 해석 파라메타에 따른 미기압과>

지금까지 수행된 해석에서는 압축기 흡입구와 배기구의 면적을 동일하게 설정하여 적절한 선의 해석 case 수에 대해 해석을 수행하였다. 또한, 흡입구와 배기구의 면적이 동일한 경우에는 배기구에서의 팽창과정에서 압축공기의 터빈을 이용해 압축기에 투입된 에너지를 회수하는 것이 가능하다. 이를 적용한 설계개념 1에 대한 파라메타 연구를 통하여 흡기구 면적 30%에서 공기저항의 저감이 가능한 것을 확인하였으며, 승객 이명감과 미기압과는 흡기구 면적이 커질수록 저감 효과가 커지는 것을 알 수 있었다.

한편, 배기구 면적을 흡기구보다 다소 작게 할 경우 배기구에서 과소팽창된 토출공기에 의해 추가적인 공기저항의 저감이 가능하다. 이를 위해 흡기구 면적을 30%로 고정하고 배기구 면적을 흡기구 면적의 85%, 80% 및 75%로 변화시켜가며 5km 길이의 터널에 대해 해석을 수행하였으며, 아래 표 2-5-3과 같은 결과를 얻었다.

먼저, 흡배기구 면적을 동일하게 설정한 경우에는 평균 공기저항이 11.7% 감소하였지만, 배기구 면적을 열차 단면적의 25.5 % (흡기구 단면적의 85%), 24% (흡기구 단면적의 80%) 및 22.5% (흡기구 단면적의 75%)로 변화시켜감에 따라 평균 공기저항 저감율은 각각 19.5%, 35.8% 및 55.0% 저감하는 것으로 나타나 배기구 단면적이 작아짐에 따라 공기저항의

저감율은 커짐을 알 수 있다. 반면, 객실 내 압력변동을 반영하는 승객이명감 지표는 흡, 배기구 단면적이 동일할 경우의 저감율 24.7%에 비해 배기구 면적이 줄어들에 따라 저감율이 점점 감소하여 최저 11.9%까지 낮아졌다. 미기압파의 경우에는 전두부의 영향만이 반영되기 때문에 배기구의 면적에 관계없이 모두 43.4%의 일정한 저감율을 나타내고 있다.

따라서, 공기저항 저감율과 승객이명감 지표 모두를 고려했을 때 설계개념 1에 대해 흡기구 면적이 열차 단면적의 30%이고, 흡기구 대비 배기구 면적이 80%인 경우를 최종 설계(안)으로 선정하였다.

<표 2-5-3 토출구 면적에 따른 터널 공기력 저감 효과(열차속도 400km/h)>

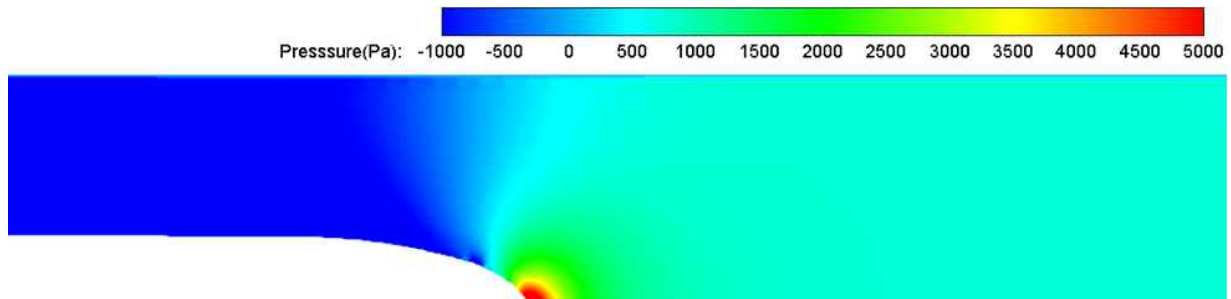
압축기 설계개념	미적용	설계개념 1	설계개념 1	설계개념 1	설계개념 1
흡입구 면적	N/A	30 %	30 %	30 %	30 %
배기구 면적	N/A	30 %	25.5 %	24.0 %	22.5 %
case name	V201-T205_ S400	V213-T205_ S400	V213_3-T205_ S400	V213_2-T205_ S400	V213_1-T205_ S400
평균 공기저항 (Δ)	8,883.4 N	7,841.7 N (-11.7 %)	7,154.1 N (-19.5 %)	5,704.0 N (-35.8 %)	3,999.9 N (-55.0 %)
승객이명감 지표 (Δ)	0.856	0.644 (-24.7 %)	0.710 (-17.1 %)	0.732 (-14.5 %)	0.754 (-11.9%)
미기압파 (Δ)	66.8 Pa	37.8 Pa (-43.4 %)	37.8 Pa (-43.4 %)	37.8 Pa (-43.4 %)	37.8 Pa (-43.4 %)
최종설계(안)				○	

마. 최종설계(안)의 터널 공기력 저감 효과

앞에서 수행된 설계개념 간의 비교를 통해 설계개념 1이 터널 공기력을 동시에 저감할 수 있는 것으로 나타났으며, 또한 다양한 파라메타 연구를 통하여 흡입구가 열차 단면의 30%, 배기구가 열차 단면의 24%인 설계가 최종설계(안)으로 선정되었다. 본 절에서는 최종 설계(안)의 터널 공기력 저감 보다 상세히 분석하였다.

아래 그림 2-5-11에는 열차가 400 km/h의 속도로 5km 길이의 터널을 통과할 경우, 열차가 터널 입구에 완전히 진입한 뒤인 $t = 5.217 \text{ sec}$ 에서의 전두부 주위 압력분포를 보여주고 있다. 먼저, 압축기가 적용되지 않은 경우인 그림 2-5-11 (a)를 살펴보면, 전두부의 터널 진입에 의해 전두부 끝단 정체점의 압력이 8,301.11 Pa까지 상승하였으며, 열차 전방에 약 3,223.3 Pa 크기의 압축파가 형성되어 전방으로 전파되는 모습을 볼 수 있다. 압축기가

적용된 그림 2-5-11 (b)의 경우에는 전두부 주위 최대압력이 7,746.2 Pa 로 낮아졌으며, 압축파의 크기도 대략 2,323.8 Pa로 낮아졌다.



(a) 압축기 미적용 시

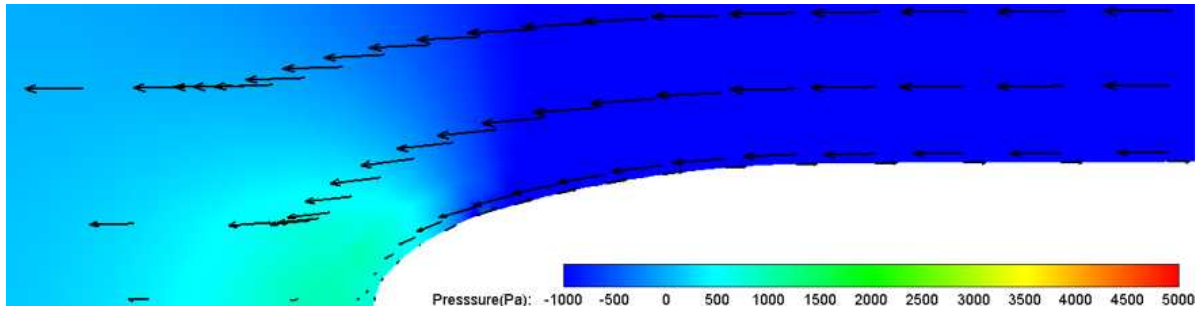


(b) 압축기 최종설계(안) 적용 시

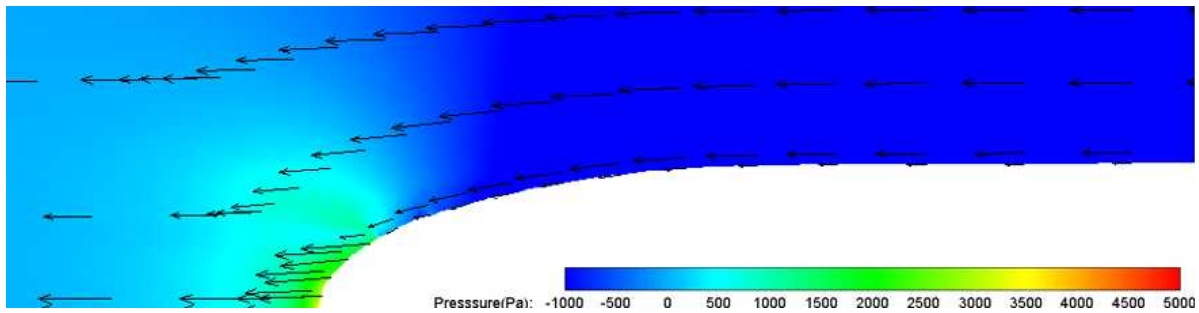
<그림 2-5-11 압축기 적용 여부에 따른 열차 전두부 주위 압력 분포(t=5.217 sec)>

아래 그림 2-5-12에는 열차가 400 km/h의 속도로 터널을 통과할 경우, 열차가 터널 입구에 완전히 진입한 뒤인 t=5.217 sec에서의 후미부 주위 압력분포를 보여주고 있다. 압축기가 적용되지 않은 경우인 그림 2-5-12 (a)에서는 물체 후미부에서 일반적으로 나타나는 유동 형태로서 유동이 팽창되어 후미부 끝단의 압력이 높아지는 압력장이 관찰된다. 반면, 압축기를 적용한 그림 2-5-12 (b)를 살펴보면, 압축기 출구 면에서는 고속의 유동으로 인해 낮은 압력을 보여주고 있으며, 출구 근방의 열차 표면에서는 다소 높은 압력분포를 나타내고 있다.

이상과 같이 압축기 적용 시의 전두부 부근의 압력 감소와 후미부 부근의 압력 증가는 모두 공기저항을 저감하는 방향으로 영향을 미칠 것으로 보인다. 또한, 열차 전두부 근방의 낮은 압력은 터널 내부에 형성되는 압축파의 크기를 근원적으로 저감시킬 것으로 예상되며, 압축파의 파두 구배도 함께 저감되어 미기압파의 크기도 줄어든 것으로 예상된다.



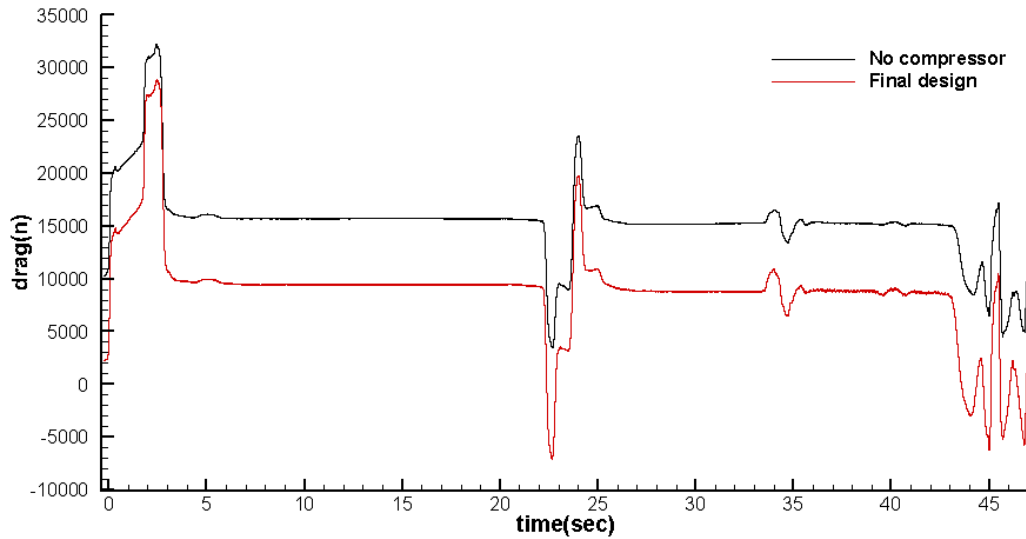
(a) 압축기 미적용



(b) 압축기 최종설계(안) 적용 시

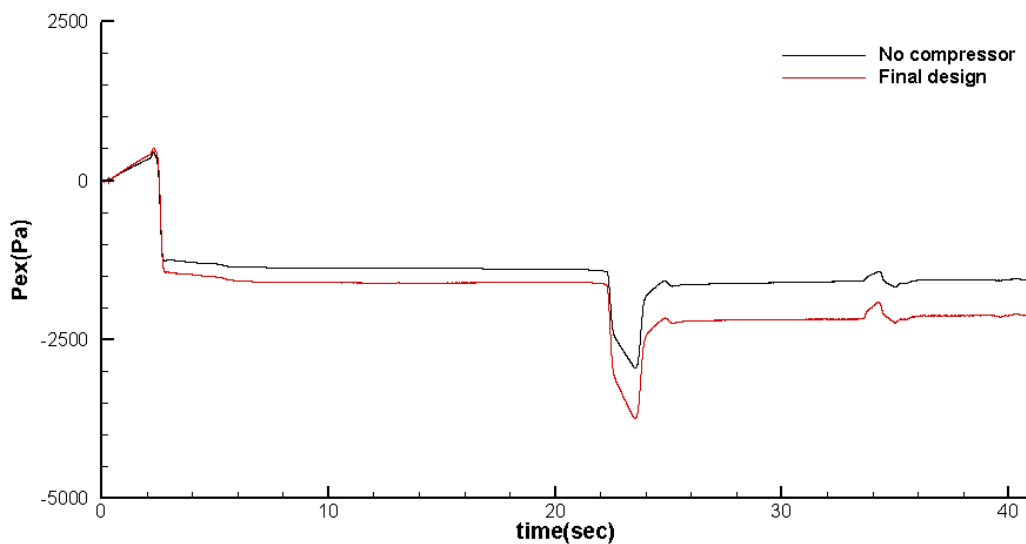
<그림 2-5-12 압축기 적용 여부에 따른 열차 후미부 주위 압력 및 속도 분포($t=5.217$ sec)>

압축기 적용 여부에 따른 공기저항의 변화를 아래 그림 2-5-13에 나타내었다. 실선으로 나타난 압축기가 적용되지 않은 경우를 먼저 살펴보면, 열차 공기저항은 열차 전두부의 터널 진입 시점($t=0$ sec) 이후로 서서히 증가하다가 열차 후미부 진입에 의해 발생한 팽창파가 열차를 통과하는 시점인 $t=1.78$ sec과 $t=2.74$ sec 사이에서는 급격히 증가하였다가 감소하는데, 이는 압력파가 열차를 통과하는 동안 열차 전후의 압력이 순간적으로 변화하기 때문이다. 이후 공기저항은 큰 변화 없이 유지되다가 압축파가 터널 출구에서 반사되어 다시 열차와 만나는 $t=22.21$ sec 이후에는 압력파의 통과에 따라 간헐적으로 급격한 감소와 증가하는 것을 보여주고 있다. 점선으로 나타난 압축기 적용에 따른 공기저항 변화를 살펴보면, 전체적인 공기저항의 변화 시점은 압축기 미적용시와 동일하나, 압축기의 영향으로 공기저항이 일정 값의 차이로 낮게 유지되는 것을 알 수 있다.

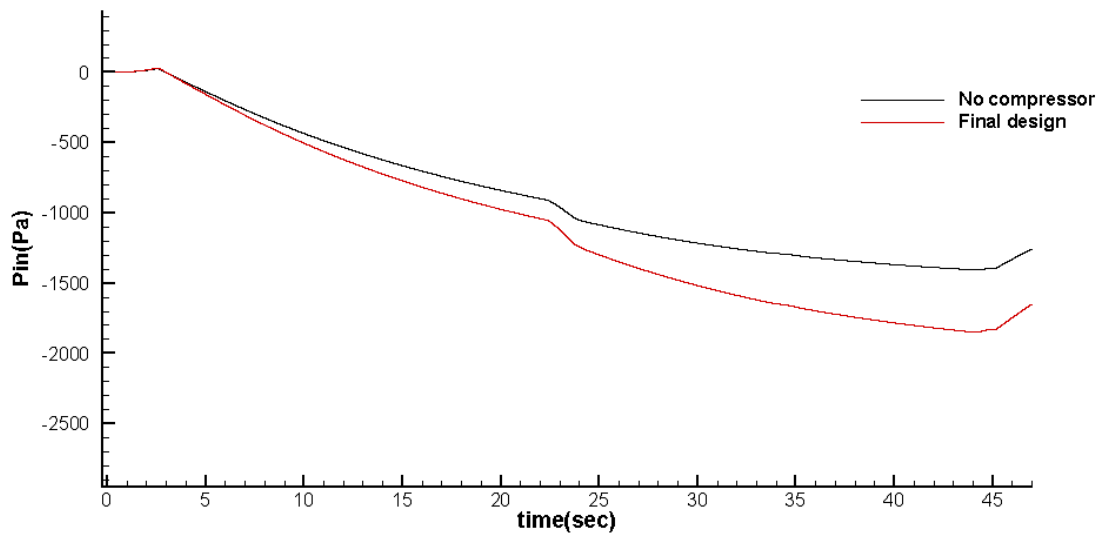


<그림 2-5-13 압축기 적용 여부에 따른 공기저항 변화>

열차가 터널을 통과하는 동안 첫 번째 객차의 중앙에 해당하는 $x=33.6$ m 지점에서의 차량 외부와 내부의 압력변동을 각각 아래 그림 2-5-14 (a)와 2-5-14 (b)에 나타내었다. 터널 진입 이후 터널 외부의 압력은 압력파의 통과에 따라 급격히 변동하는 것을 볼 수 있으며, 압축기 미적용 시(—)에 비해 최종설계(안) 적용 시(—)의 압력 변동은 보다 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 때문에 차량 기밀도 $\tau=18$ sec을 적용했을 때 객차 내부의 압력변동을 나타낸 2-5-14 (b)에서 보이듯이 압축기를 적용하였을 때에는 객실 내 압력변동도 보다 작아짐을 알 수 있다.



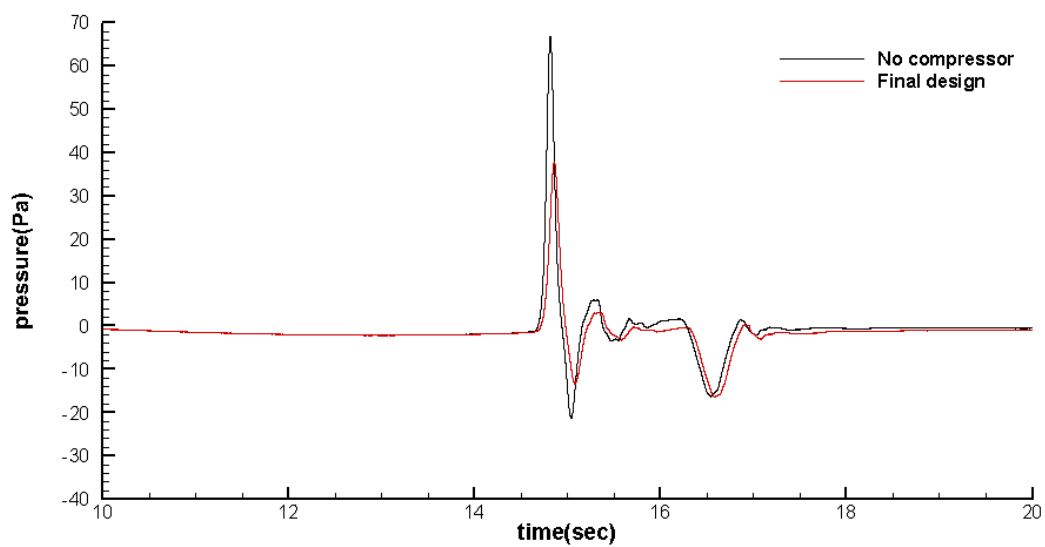
(a) 외부 압력



(b) 내부 압력

<그림 2-5-14 압축기 적용 여부에 따른 차량 내외부 압력 변동>

미기압파의 강도를 살펴보기 위하여 터널 출구로부터 20m 떨어진 지점에서 모니터링된 압력변동을 그림 2-5-15에 나타내었다. 압축기의 영향으로 압력파의 크기가 줄어들며 따라 압축파의 파두 구배도 줄어들게 되며, 결과적으로 미기압파의 크기도 상당히 줄어든 것을 알 수 있다.



<그림 2-5-15 압축기 적용 여부에 따른 미기압파>

앞에서 제시한 공기저항, 객실 내 압력변동 및 미기압파의 크기를 아래 표 2-5-4에 정리하여 나타내었다.

먼저 공기저항의 경우, 터널 통과하는 동안의 비정상 공기저항을 시간에 대해 적분하여 평균 공기저항을 계산한 결과, 압축기 미적용 시에는 8,883.4 N으로 나타났으며, 압축기 적용 시에는 5,704.0 N으로 35.8% 감소한 것으로 나타났다. 따라서, 압축기는 승객이명감과 미기압파를 저감하는 기능을 할 뿐만 아니라 열차 주위 압력장 변화와 여분의 추력 발생을 통해 공기저항을 저감하여 압축기 가동에 소모된 에너지 일부를 회수할 수 있다는 것을 의미한다. 다만, 압축기 적용에 따른 전체 에너지 소모의 증가는 압축기 상세설계가 이루어져야 가능하다.

객실 내 압력변동의 경우, 300 km/h의 속도에서 1초, 3초, 10초 간의 최대 압력변동은 각각 72.85 Pa, 169.11 Pa, 437.09 Pa로서 교행 시를 감안하여도 국내외 기준은 500 Pa, 800 Pa, 1000 Pa을 충분히 만족시키는 것을 볼 수 있다. 그러나, 열차속도 400 km/h 에서는 131.27 Pa, 297.98 Pa, 855.72 Pa로서 교행 시에는 10초 간 압력변동이 기준을 초과할 가능성이 있어 보인다. 압축기를 적용할 경우 압력변동은 99.10 Pa, 255.50 Pa, 731.79 Pa 로 다소 간 감소하는 등 압축기가 객실내 압력변동을 저감시키는 것을 알 수 있으며, 객실 내 압력변동이 기존선로에서의 증속을 제약하는 경우 하나의 해결 방안이 될 수 있음을 보여준다.

마지막으로 미기압파의 경우, 미기압파의 참고기준은 일본의 50 Pa 으로서 열차속도 300 km/h 에서는 23.14 Pa 로 기준치 이하를 나타내며, 실제로도 호남선 등에서는 미기압파로 인한 충격성 소음의 문제가 발생하지 않고 있다. 그러나, 400 km/h 로 주행 시에는 66.83 Pa로서 미기압파 기준치를 초과하게 되는데, 압축기를 적용하였을 경우에는 43.4% 감소한 37.8 Pa로 나타내며 기준치 이하가 됨을 알 수 있다. 이 경우에도 미기압파가 속도 증가의 제약요인이 될 경우 압축기가 해결 방안이 될 수 있음을 보여주고 있다

<표 2-5-4 압축기 최종설계(안) 적용에 따른 터널 공기력 저감 효과>

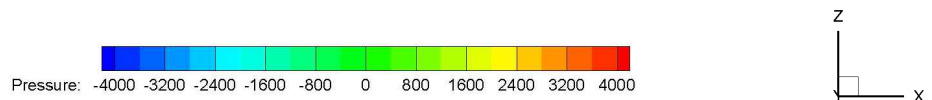
압축기 적용 여부		압축기 미적용		압축기 적용	기준치
열차 속도		300km/h	400km/h	400km/h	
평균 공기저항		5,863.4 N	8,883.4 N	5,704.0 N	N/A (35.8% 저감)
단위시간 당 압력변동	$\Delta t = 1 \text{ sec}$	72.85 Pa	131.27 Pa	99.10 Pa	< 500 Pa
	$\Delta t = 3 \text{ sec}$	169.11 Pa	297.98 Pa	255.50 Pa	< 800 Pa
	$\Delta t = 10 \text{ sec}$	437.09 Pa	855.72 Pa	731.79 Pa	< 1000 Pa
미기압파		23.14 Pa	66.83 Pa	37.81 Pa	< 50 Pa

4. 3차원 해석 결과

가. 압축기 적용에 의한 터널 내 압력장 변화

압축기 적용에 의한 터널 공기력 저감 효과를 고속열차 및 터널 3차원 모델에 대해 검증하였다. 대상 열차는 KTX-산천 열차이며, 3차원 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 열차의 터널 진입부터 진출까지의 각 시간 별 비정상 해를 구하기 위해서는 막대한 시간과 계산 용량이 필요하기 때문에 본 연구에서는 터널 길이 1km 에 대하여 설계개념 1 중 압축기 흡,배기구 면적이 모두 20% 인 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

아래 그림 2-5-16에서 그림 2-5-20에는 터널 통과 시 열차 주위 3차원 유동장의 변화를 압축기 적용 여부에 따라 비교하여 살펴보았다. 먼저, 열차가 터널에 진입하기 직전인 $t = 0.41 \text{ sec}$ 에는 압축기 적용 여부에 따른 압력 분포의 차이가 크게 나타나지 않는다. 물론, 터널에 진입하기 전부터 압축기가 가동하는 것으로 설정되었기 때문에 압축기 적용 조건에서는 전두부 흡입구 및 후미부 배기구에서 각각 질량유량이 흡입되고 배출되는 경계조건이 적용되고 있는 상황이다. 하지만, 개활지에서는 압축기의 가동으로 인한 주위 유동장의 변화가 터널 주행에 비해 상대적으로 크지 않기 때문에 터널 통과 전 시점을 대상으로 $-4000\text{Pa} \sim 4000\text{Pa}$ 로 설정한 압력범위에서는 압축기 적용에 따른 압력장의 차이가 크게 드러나지 않는 것이다. 물론, 압력범위를 줄이고 전두부 및 후미부 근처를 확대하면 압축기 적용 여부에 따라 압력장의 변화가 드러나지만, 본 연구는 터널 통과 시의 압축기의 공기력 변화를 평가하는 것이 목적이기 때문에 이후 터널 통과 중의 열차 주위 압력분포와 비교하여 위하여 이처럼 압력 범위를 넓게 설정하였다.



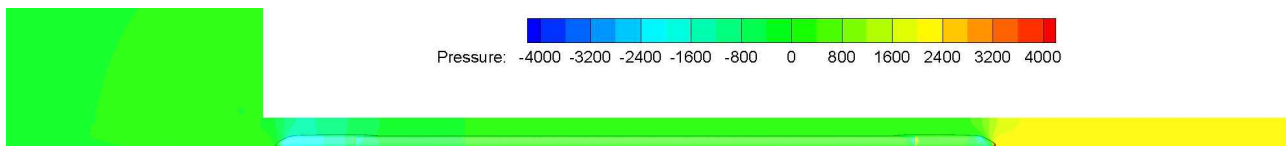
(a) 압축기 미적용 시



(b) 압축기 적용 시

<그림 2-5-16 압축기 적용 여부에 따른 3차원 열차 주위 압력 분포 ($t = 0.41 \text{ sec}$)>

그림 2-5-17에는 열차가 터널에 진입하여 후미부가 터널 입구에 진입한 직후인 $t=2.3 \text{ sec}$ 의 시점에 대해 열차 주위 압력분포를 나타내고 있다. 그림에서 보이듯이 열차가 터널에 진입한 이후에는 압축기 적용의 효과가 열차 주위 및 터널 내의 압력에 두드러지게 나타남을 알 수 있다. 그림 2-5-17 (a)에 나타난 압축기 미적용 시의 압력분포에서 열차 전두부 앞에는 상대적으로 높은 압력장이 형성되는 것을 관찰할 수 있으며, 이는 열차 전두부의 터널 진입으로 인해 발생한 압축파로 인한 것이다. 반면, 압축기가 적용된 그림 25-17 (b)를 살펴보면, 열차 전두부 앞단의 압력이 압축기 미적용시에 비하여 매우 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 압축기 미적용 시 전두부 앞단의 압력은 2202.3 Pa 이며, 이에 비해 압축기 적용 시 전두부 앞단의 압력은 1571.77 Pa 로서 압축기 적용으로 인하여 열차 전두부 압력이 28.6 %나 감소하였음을 알 수 있다.



(a) 압축기 미적용 시



(b) 압축기 적용 시

<그림 2-5-17 압축기 적용 여부에 따른 3차원 열차 주위 압력 분포 ($t = 2.30 \text{ sec}$)>

그림 2-5-18에는 열차가 터널 내를 주행하는 $t= 5.94 \text{ sec}$ 의 시점에 대해 열차 주위 압력분포를 나타내고 있다. 압축기 적용 시에는 미적용 시에 비하여 상대적으로 압력 저하가 낮게 나타나고 있으며, 이것이 공기저항 저감에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.



(a) 압축기 미적용 시



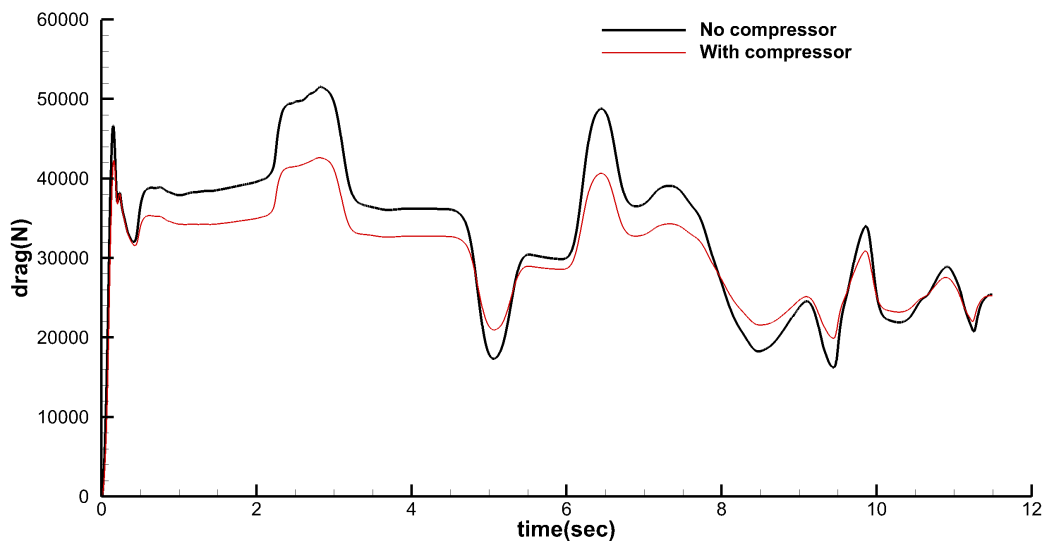
(b) 압축기 적용 시

<그림 2-5-18 압축기 적용 여부에 따른 3차원 열차 주위 압력 분포 ($t = 5.94 \text{ sec}$)>

나. 압축기 적용에 의한 터널 공기력 변화

아래 그림 2-5-19에는 터널 통과 시 시간에 따른 공기저항의 변화를 압축기 적용 여부에 따라 비교하여 도시하였다. 측대칭 해석 결과와 마찬가지로 반사 팽창파와 압축파가 통과하는 시점 사이인 4.5초에서 5초, 그리고 8초 이후 일부 구간을 제외하고는 전반적으로 압축기 미적용인 경우보다 상당히 낮은 공기저항을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 또한,

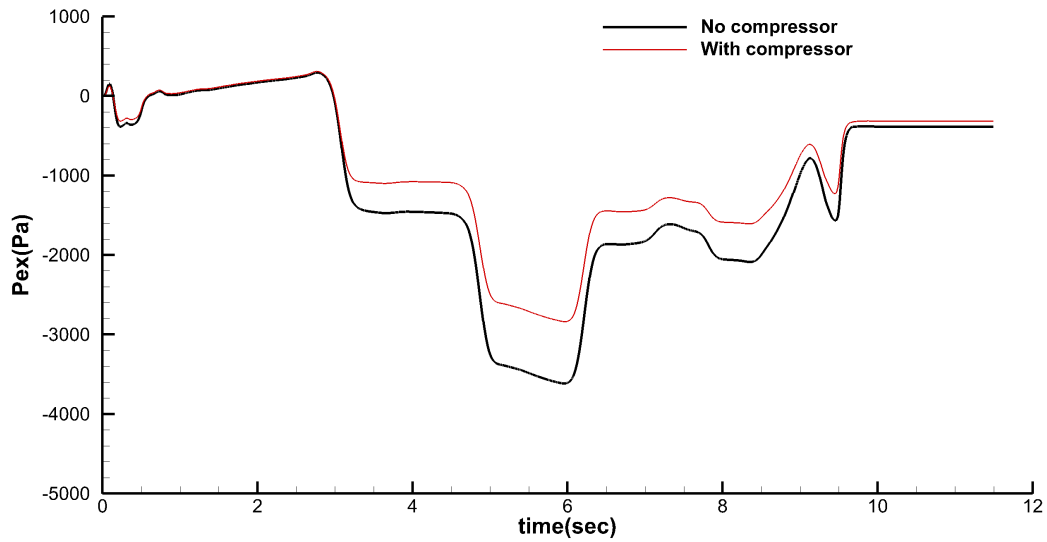
앞서 살펴본 바와 같이 열차의 터널 진입에 의한 압축파와 팽창파가 열차를 통과하면서 열차 전, 후미 간의 압력 차이가 순간적으로 발생하기 때문에 해당되는 시점들에서 공기저항이 급격히 변화함을 알 수 있다. 압축기의 적용으로 압력파를 완화시키기 때문에 전반적으로 공기저항이 크게 감소하는 것을 알 수 있다.



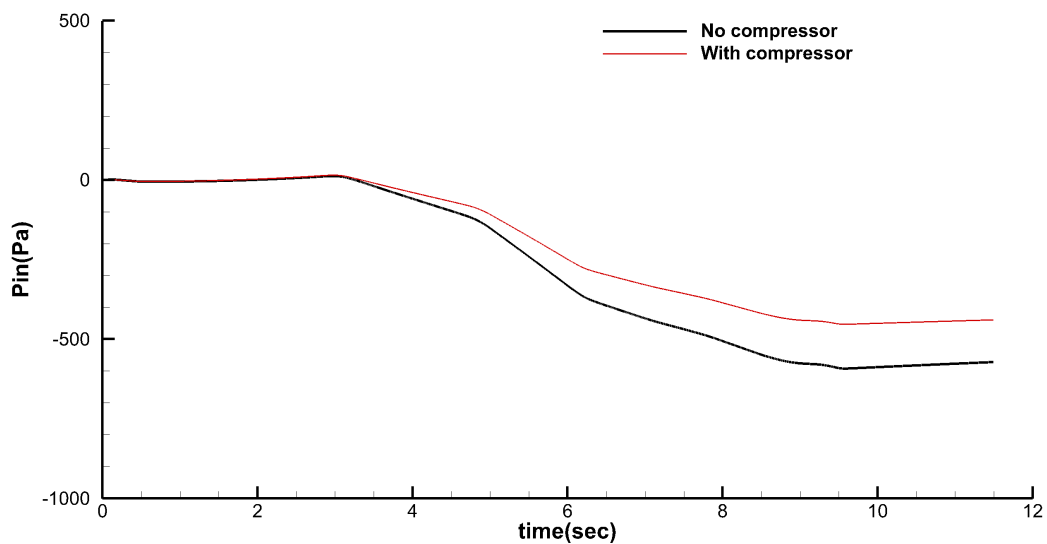
<그림 2-5-19 압축기 적용 여부에 따른 공기저항 변화(3차원 해석)>

아래 그림 2-5-20 에는 각각 열차 외부 및 내부에서의 압력변동을 나타내고 있다. 먼저, 그림 2-5-20 (a)에 나타난 외부압력 변화는 압축기 미적용 시(—)에 비하여 설계개념 1(—)이 현저하게 낮게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 이 또한 공기저항의 저감과 마찬가지로 압축기의 적용으로 인한 압력파를 완화에 기인한다고 볼 수 있다.

그림 2-5-20 (b)에 나타난 열차의 기밀도를 18 sec로 적용하여 계산된 객실 내부압력 변화를 살펴보면, 외부압력 변화와 마찬가지로 설계개념 내부압력 변화가 크게 줄어들었음을 알 수 있다. 압축기 미적용 시 1초, 3초 및 10초 간 압력변동은 180.4 Pa, 396.1 Pa 및 652.4 Pa 이었으나, 압축기 적용 시에는 각각 143.0 Pa, 315.4 Pa 및 519.5 Pa로 압축기 적용으로 실내 압력변동이 20% 가량 저감되었다.



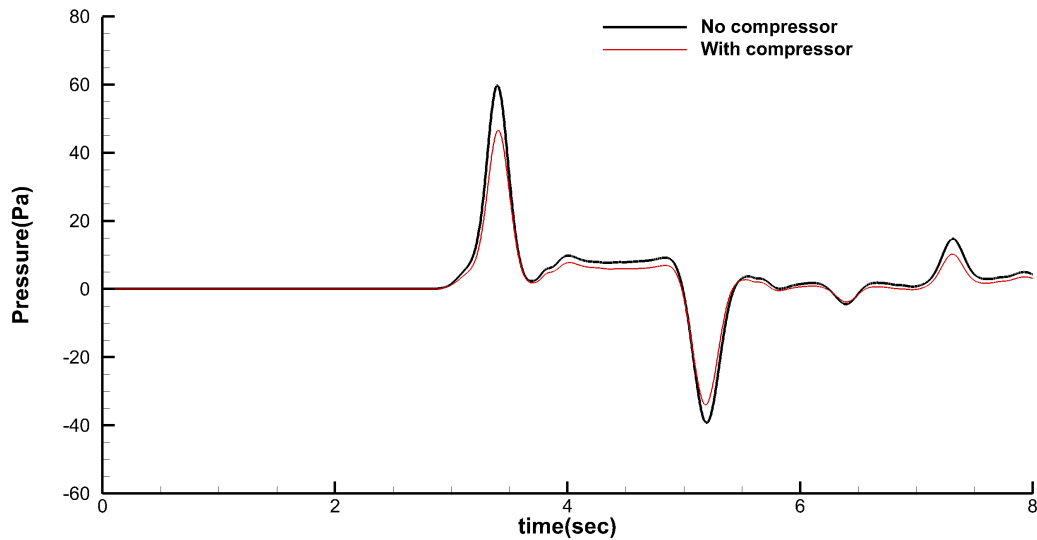
(a) 외부 압력



(b) 내부 압력

<그림 2-5-20 압축기 적용 여부에 따른 차량 내외부 압력 변동(3차원 해석)>

아래 그림 3-5-21에는 터널 출구 20m에서 모니터링된 압력변동을 기준으로 측정된 미기압파의 파형을 나타내고 있다. 축대칭 해석 결과와 마찬가지로 압력파가 터널을 음속으로 일주한 직후 직후에 펄스파 형태의 미기압파가 관찰됨을 알 수 있으며, 압축기가 적용되지 않은 경우(—)의 미기압파 강도는 59.8 Pa로서 미기압파 적용 시(—)는 22.1% 저감된 44.6 Pa로 나타났다.



<그림 2-5-21 압축기 적용 여부에 따른 터널 미기압파(3차원 해석)>

5. 소결

본 연구에서는 축대칭 및 3차원 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 흡,배기구 면적, 열차 속도, 터널 길이 등의 파라메타를 바꾸어가며 압축기 적용 고속열차의 터널 공기력 저감 효과를 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 3종의 설계개념 후보를 비교하여 평가한 결과, 선두차량 내부에 압축기를 장착하여 전두부에서 흡입, 후미부에서 배출하는 방식의 열차 단수 압축기형(설계개념 1)이 공기저항과 객실 내 압력 변동 및 미기압파 등 모든 터널 공기력의 저감이 가능한 것으로 나타났다.
- 선정된 설계개념 1에 대해서 압축기 입출구 면적과 터널 길이를 바꾸어가며 해석을 수행한 결과, 흡기구 면적이 열차 단면적의 30%이고, 흡기구 대비 배기구 면적이 80%인 경우를 최종 설계(안)으로 선정하였다.
- 최종 설계(안)의 평균 공기저항 저감율은 35.8%였으며, 승객 이명감 지표 저감율 14.5%, 미기압파 저감율 43.4% 로서 객실 내 압력변동 및 미기압파를 모두 기준치 이하로 유지함을 알 수 있었다.
- 열차 및 터널의 형상을 3차원으로 모델링하여 3차원 해석을 수행한 결과, 축대칭 모델에서와 마찬가지로 평균 공기저항, 객실 내 압력변동 및 미기압파를 모두 효과적으로 저감함을 확인할 수 있었다.

제 6 절 결론

본 연구에서는 공기저항, 승객 이명감 및 미기압과 등 터널 공기력을 저감하기 위하여 하이퍼루프와 같이 압축기를 차량에 적용하여 공기력을 효율적으로 저감하는 기술 개발하였다.

먼저, 고속열차에 적용가능한 압축기를 탐색하기 위하여 기존 압축기 타입과 모델을 분석하였으며, 다양한 압축기를 고속열차에 적용하는 다양한 설계개념을 도출하여 최종적으로 3가지 타입의 하이퍼루프형 압축기 적용 고속열차 설계개념을 도출하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 고속철도에 적용하기 위한 압축기 후보 모델 3종에 대하여 압축기 성능조건과 제약 조건의 비교검토를 수행하여 철도차량 내부에 탑재 가능한 최대직경 0.4m, 최대길이 0.3m 정도인 다단 축류압축기인 ‘항공기 엔진용 3단 천음속 축류압축기’를 고속열차 적용에 가장 적합한 압축기로 선정하였다.
- 설계개념 아이디어의 분석 및 형태소분석기법(Morphological analysis)을 이용하여 5개 시스템 구성요소를 도출하고 각 구성요소 별 대안의 조합을 이용하여 총 72개의 설계개념 후보를 도출하였다.
- 조합 불가능 대안의 배제, 터널 공기력 저감 효과 및 차량 적용성 분석 등을 통하여 열차 단수 압축기형, 선두차 단수 압축기형 및 압축기 외부장착형 등 총 3개의 최종 설계개념 후보를 도출하였다.

또한, 고속열차 전용 CFD 해석 프로그램을 개발하여 터널-열차 모형에 대해 강건하고 정확한 유동해석을 수행하는 동시에 압축기 적용 시의 공기력 저감 효과를 검토할 수 있는 수치해석 도구를 마련하였으며, 고속열차에 대한 다양한 해석을 용이하게 수행할 수 있는 사용자 환경을 구성하였다. 또한 개발된 프로그램 및 사용자 환경에 대한 검증 해석을 수행하였으며, 압축기 적용 고속열차에 대한 실증해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 압축기 유입구 및 토출구에서의 유동 조건을 계산할 수 있는 압축기 성능곡선 및 모듈을 도출하였으며, 유동 해석 프로그램과 압축기 모듈을 연동하여 경계조건을 부여하는 프레임워크를 구축하였다.

- 격자 정보 없이 질점만으로 구성된 해석 질점계 상에서 지배방정식인 나비에-스톡스 방정식을 이산화하여 점성 난류 유동 해석을 수행할 수 있는 무격자 기반 유동해석 기법을 개발 및 검증하였다.
- 고속열차 해석 과정에서 생성되는 형상곡선, 해석용 질점계, 유동 해석 결과(x-t선도, 압력 변동 이력, 미기압과 등)를 GUI 상에서 확인할 수 있으며, 외부 프로그램으로 paraview를 연동할 수 있도록 스크립트를 실행할 수 있는 사용자 전후처리 환경을 구성하였다.
- 개발된 프로그램 및 사용자 인터페이스에 대한 검증으로써 KTX 열차의 복안터널 통과 문제를 해석하였으며, 해석 정확도 검토 결과 승객 이명감 1.6%, 미기압과 4.0% 등 모든 검증 항목에서 기존 프로그램(C-STA) 대비 96% 이상의 정확도를 나타냄을 확인하였다.

마지막으로 축대칭 및 3차원 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 흡,배기구 면적, 열차 속도, 터널 길이 등의 파라메타를 바꾸어가며 압축기 적용 고속열차의 터널 공기력 저감 효과를 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 3종의 설계개념 후보를 비교하여 평가한 결과, 선두차량 내부에 압축기를 장착하여 전두부에서 흡입, 후미부에서 배출하는 방식의 열차 단수 압축기형(설계개념 1)이 공기저항과 객실 내 압력 변동 및 미기압과 등 모든 터널 공기력의 저감이 가능한 것으로 나타났다.
- 선정된 설계개념 1에 대해서 압축기 입출구 면적과 터널 길이를 바꾸어가며 해석을 수행한 결과, 흡기구 면적이 열차 단면적의 30%이고, 흡기구 대비 배기구 면적이 80%인 경우를 최종 설계(안)으로 선정하였다.
- 최종 설계(안)의 평균 공기저항 저감율은 35.8%였으며, 승객 이명감 지표 저감율 14.5%, 미기압과 저감율 43.4% 로서 객실 내 압력변동 및 미기압과를 모두 기준치 이하로 유지함을 알 수 있었다.
- 열차 및 터널의 형상을 3차원으로 모델링하여 3차원 해석을 수행한 결과, 축대칭 모델에서와 마찬가지로 평균 공기저항, 객실 내 압력변동 및 미기압과를 모두 효과적으로 저감함을 확인할 수 있었다.

제 3 장 연구개발 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

제 1 절 연구개발 목표 및 달성도

1. 연구개발의 최종 목표

기존 고속선의 터널 단면적을 유지하면서 운행속도를 400km/h로 증속할 경우 발생하는 공기저항, 승객 이명감 및 미기압파 등 터널 공기력 문제를 해결하기 위해 하이퍼루프와 같이 압축기를 차량에 적용하여 공기력을 효율적으로 저감하는 기술 개발

2. 연차 별 세부 연구목표 및 목표 달성도

가. 1차 년도 연구개발 목표 및 목표 달성도

세부 연구 목표	연구개발 내용	연구 결과	목표 달성도
- 하이퍼루프형 압축기 적용 고속열차 공기역학 설계개념 제시	■ 하이퍼루프 압축기 설계개념 분석 및 고속열차 적용성 검토 ■ 압축기 적용 고속열차 공기역학 개념설계 및 모델링	- 고속철도 운영조건 검토를 통한 압축기 요구사항 분석 - 기존 압축기 타입 분석 및 후보 모델 3종 선정 - 압축기 모델 비교검토를 통한 고속열차 적용 모델 1종(항공기 엔진용 3단 천음속 축류압축기) 선정 - 기존 하이퍼루프 시스템(HTT, TransPod, Hyper Pod and, Zeleros 등) 압축기 형상 검토 - 압축기 설치 관련 설계변수 검토 및 조합을 통한 10개 설계개념 아이디어 도출 - Morphological analysis 기법을 이용한 아이디어 전개 및 체계화를 통해 설계개념(안) 3종 선정	100 %
- 압축기 적용 고속열차 해석을 위한 무격자 기법 개발	■ C-STA™를 활용한 형상 전처리 방법 개발 ■ 압축기 모델링 기법 및 경계 조건 개발 ■ 격자 연결정보를 사용하는 기존 세대 유동해석과 달리 질점만 이용한 해석기법 개발 및 활용 ■ 고속 열차의 터널 통과 모사를 정확하고 효율적으로 처리하는 이동 질점법 개발	- C-STA™ 입력 항목 기준으로 형상을 구현하여 터널 및 열차 형상을 입력하는 전처리 방법 개발 - 경계 질점과 내부 질점을 구분하는 무격자 질점 생성 전처리 기법 개발 - 경계면 구분 기능 구현하는 전처리 루틴 개발 - 압축기 모델 경계 조건 개발(subsonic inflow/outflow, mass flux inlet/outlet) - 비정상 공력해석을 위한 무격자 기법 개발 · 무격자 기법 대응 축대칭 비정상 압축성 유동 해석 기법 개발 · 해당 기법에서의 kw-sst 모델 구현 및 검증 - Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) Method를 적용한 이동 질점법 개발 · 무격자 해석 질점계 on/off 구성 기법 개발 · 물체 이동 시 질점 재구성 방법 개발	100 %

나. 2차 년도 연구개발 목표 및 목표 달성도

세부 연구 목표	연구개발 내용	연구 결과	목표 달성도
- 압축기 적용 고속열차 공기역학 상세설계(안) 제시	■ 압축기 적용 고속열차의 터널 통과 시 터널 내 비정상 유동장 해석	- 축대칭 비정상 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 압축기 적용 열차의 터널 통과 문제를 압축기 설계 개념, 흡입/배기구 면적, 터널 길이, 열차 속도 등을 바꾸어 총 68개 조건에 대해서 해석을 수행 - 3차원 비정상 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 최종설계개념에 대하여 3개 조건에 대해서 해석을 수행	100 %
	■ 설계개념 별 터널 공기력 저감 효과 분석 및 최종 설계개념 선정	- 3종의 설계개념(안)에 대하여 터널 공기력 해석을 실시하여, 그 중 공기 저항, 객실 내 압력변동, 미기압파 등 모든 터널 공기력의 저감이 가능한 설계개념 1을 선정 - 파라메타 연구를 통해 파라메타 별 공기력 저감 효과를 분석하였으며, 최적의 압축기 흡/배기구 면적을 이용하여 열차 단면적의 30% 및 24%의 흡/배기구 면적을 갖는 최적설계(안) 선정	
	■ 최종 설계개념에 대한 파라메타 연구 및 상세설계	- 최적설계(안)의 터널 공기력 저감 효과를 분석한 결과 공기저항은 35.8% 저감되는 것으로 나타났고, 승객이명감 지표와 미기압파는 각각 14.5%, 43.4% 저감되며 기준치를 충족하는 것으로 나타남 - 최적설계(안)에 대한 3차원 해석을 통해 축대칭 해석에서 분석된 공기저항, 승객이명감 및 미기압파의 저감 효과를 확인할 수 있었으며 이를 통해 압축기 적용 고속열차의 터널 공기력 저감 효과를 입증	
- 압축기 적용 고속열차 해석 프로그램(GUI) 개발	■ 그래픽 사용자 환경(GUI) 개발	- 통상적인 전산유체역학 실행환경인 리눅스 운영체제의 기본으로 하여 파이썬(Python)언어를 이용하여 공개 라이브러리 중 PyGTK 기반으로 사용자 환경을 제작 - Gtk2, pygtkglext 등 다양한 라이브러리를 이용하여 GUI 상에서 사용자가 직접 처리할 수 있는 환경을 구축하여 유동해석을 용이하게 하도록 구현 - 제어화면의 경우, 해석 케이스를 각 폴더 단위의 프로젝트로 관리하게 하여 프로젝트 매니저에서 해석케이스를 수정하여 즉시 해석 수행에 반영하여 활용할 수 있음	100 %
	■ 전후처리 환경	- GUI에서 형상 파라메타를 이용하여 형상 곡선을 모델링한 후, 유동해석용 질점계를 생성하기 위하여 질점 밀도 관련 파라메타를 조절하면 자동적으로 생성될 수 있는 환경 구축 - 해석이 완료된 케이스에 대해 거리-시간 압력 컨투어, 시간-미기압파 세기, 시간-항력, 시간-객실 내부 압력 등의 해석 결과 데이터 파일을 paraview로 가시화하는 인터페이스 구축 - 터널 내부 압력 변동 이력을 거리-시간 공간에 대한 2차원 컨투어로 가시화하는 X-t diagram을 통해, 특정 위치, 시간, 객차에서의 압력변동 이력 추출 가능	

3. 성과목표 달성도

- 공기저항 저감 35.8%(목표치 20%), 해석 프로그램 정확도 96%(목표치 90%) 등 총 9건의 질적 성과목표 모두 달성
- 특허 출원 3건, 등록 1건, 논문 3건, 프로그램 등록 2건 등 양적 성과지표 10점 달성에 성과목표 10점(최소 성과목표 6점) 대비 100% 달성
- ※ SCI-E 저널에 19년 07월 26일 투고하였으나 약 8개월이 지난 지금 Revisions Being Processed 상태에 머물러 있음

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 달성/목표	
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치		
주관	1	하이퍼루프형 압축기 적용 고속열차 공기역학 설계개념	1-1	고속철도에 적용 가능한 압축기 선정 결과	①	기존 압축기 비교 검토	3 건	3 건	자료 수집	수집 자료	10	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건	
					②	압축기 선정 안	1 건	1 건	비교검토	비교검토 결과 보고서	10		
			1-2	압축기 적용 고속열차 공기역학 설계개념	①	설계개념 아이디어 도출	10 건	10 건	아이디어 스케치	설계개념 해설서	10		특허: 출원 3/2 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 1/1 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건
					②	설계개념	3 건	3 건	도면 작성	설계도면	10		
	2	압축기 적용 고속열차 공기역학 상세설계 (안)	2-1	최종 설계 개념에 대한 공기역학 최적설계(안)	①	터널 공기저항 저감	20% 이상 저감	35.8% 저감	전산유체 해석	해석 결과	10	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 1/1 건 논문: <u> </u> 1/2 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건	
					②	승객이명감	고속철도 기준 이내	기준 만족	전산유체 해석	해석 결과	10		
				③	미기압파 기준	50Pa 이내	기준 만족	전산유체 해석	해석 결과	10			
공동	3	압축기 적용 고속열차 전용 CFD 해석 프로그램	3-1	압축기 적용 고속열차 전용 CFD 해석 프로그램	①	고속열차전용 무격자 기법 코드 개발	1 건	1 건	보고서 검토	보고서	15	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 1/1 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 2/1 건	
					②	GUI플랫폼 개발 및 적용	C-STA™ 기준 90% 정확도	96% 이상	전산유체 해석	해석 결과	15		
계											100	특허: 출원 3/2 건 등록 <u> </u> 1/1 건 논문: <u> </u> 3/4 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 2/1 건	

제 2 절 관련 분야 기여도

1. 국내 고속철도 400km/h 증속의 최대 기술현안 해결

현재 300km/h의 속도에 맞춰 설계된 경부고속선 및 호남고속선의 터널에서 400km/h로 증속하여 운행할 경우 공기저항은 78% 증가, 열차 내부 압력변동은 최대 95%, 미기압과는 2.8배 가량 증가하여 에너지 소모의 급격한 증가, 승객이명감 및 미기압과 기준의 초과가 우려되는 상황이다.

운행 중인 선로에서의 터널 단면적 확장이 불가한 상황임을 감안하면 신규 개발되는 고속열차에는 미래 교통수단인 하이퍼루프에서 사용되는 압축기를 이용한 공기력 저감 기술 등 적극적인 유동제어 기술을 적용하여 터널 공기력을 저감함으로써 국가철도망의 운영속도를 400km/h로 증대시킬 수 있는 핵심 기술을 확보할 수 있다.

2. 능동유동제어 기술의 도입을 통한 국내 고속철도차량 고부가가치화

자동차 산업에서는 휠 에어커튼, 능동형 라디에이터 플랩 등 다양한 능동 및 수동 유동제어기술을 이용하여 연비와 주행안정성을 향상시키는 기술이 개발되었으며, 최근에는 고성능 경주용 차량 뿐만 아니라 일반 양산 차량에까지 적용되고 있다.

고속철도차량의 경우에도 최근들어 최고운행속도 350km/h까지 높아지는 등 속도 증가를 통해 승객 편의를 높이려는 추세가 점점 확대되고 있어 다양한 유동제어기술이 고속열차에 도입될 가능성이 높아지고 있다. 또한, 기존 철도차량에서 진일보한 에너지효율화, 스마트기술 적용을 통한 차세대차량 기술개발이 유럽, 일본, 중국 등 세계 각국에서 추진되어 세계적인 고속철도차량 기술의 경쟁이 점점 더 치열해가고 있는 시점에서 기존에는 시도되지 않았던 능동유동제어 기술을 도입할 경우 한국 고속철도차량기술의 기술적 위상을 높이고 고속철도차량 해외수출 경쟁력을 제고할 수 있다.

3. 개발 프로그램의 산업계 활용으로 인한 고속열차 및 터널 설계 효율화

본 연구에서 개발된 무격자 기법 기반의 고속열차 터널 주행 해석 프로그램은 압축기 적용 고속열차의 터널 공기력 저감 효과를 정확하고 효율적으로 해석하는데 사용되었다. 뿐만 아니라 본 프로그램은 기존 고속열차 터널 주행 시 발생하는 다양한 공기역학적 문제를 정확하게 분석, 예측할 수 있기 때문에 앞으로 개발, 건설될 고속열차 및 고속선 터널의 설계에 널리 활용될 수 있으며, 본 연구에서 개발된 고속열차 해석 전용 GUI는 해석 및 분석의 효율성을 높여 산업계의 활용도가 매우 높을 것으로 예상된다.

제 4 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구 결과의 활용 방안

- 터널 단면적의 확대 없이 터널 공기력을 저감할 수 있는 압축기 적용 고속열차 실차를 개발하여 국내 고속선 운영속도를 400km/h로 증대시키는 데 활용함
- 압축기 적용 등 능동형 유동제어기술을 적용한 고부가가치 고속열차 개발의 본격적인 연구를 촉진하고, 이에 본 연구의 결과물들이 활용될 수 있을 것으로 기대됨
- 본 연구에서 개발된 압축기 적용 고속열차 전용 CFD 해석 프로그램은 향후 압축기 적용 고속열차의 개발 시 설계 및 해석에 활용되어 물리적 실험의 한계를 보완함

제 2 절 기대성과 및 파급효과

1. 기술적 측면

- 압축기 적용 기술로 터널 내 공기력을 저감하여 터널 단면적의 확대 없이 공기저항, 승객이명감 및 미기압과 저감
- 국가철도망의 최고 운영속도 400km/h를 달성하여 현재 고속철도 최고 운영 속도인 베이징-상하이 구간 350km/h를 넘어 세계최고 기록 달성

2. 경제적 · 산업적 측면

- 압축기 적용 기술로 터널 내 주행저항이 감소하여 차량 에너지 소모 및 전력요금 절감
- 압축기 적용 기술로 터널 내 공기력을 저감하여 미기압과 및 승객이명감 저감을 위한 터널 확폭 공사 및 터널 후드 설치 비용 절감
- 최첨단 교통시스템인 하이퍼루프에 사용된 압축기 기술을 적용한 고부가가치 고속철도차량으로서 한국 고속철도차량기술의 위상 강화 및 수출 경쟁력 제고

3. 사회적 측면

- 최고 운영속도 증가로 고속철도 이동시간이 1시간 이내로 단축되고 이에 따라 주요 도시 간 door-to-door 이동시간이 2시간대로 단축되어 고속철도 승객의 시간 절감
- 이동시간 절감 효과로 국민의 철도 이용 수요가 증가하여 항공 및 자동차의 온실가스 저감 효과 증가 및 친환경 교통체계 구축에 기여

붙임 1. 참고문헌

- [1] J.S. Choi(2014), Effects of Ten Years of High-Speed Rail Operation in Korea, The Korea Transport Institute , 2014.02, 1-72.
- [2] KTX 경제권 특성화 개발 연구(2012), The Korea Transport Institute
- [3] 고속철도 고속화 및 시스템 최적화 방안 연구 (2016), 국토교통부
- [4] FUJII, T.(2001), “Studies on elucidation of glaciological damage to railways in snowy areas and their countermeasures,” RTRI Report, 47, 255.
- [5] Ozawa, S.(1997), “Studies of micro3pressure wave radiated from a tunnel exit rail,” Tech. Res. Rep., Japanese National Railways, 1121.
- [6] Kim, S.W., Kwon, H.B., Kim, Y.G., Park, T.W.(2006), “Calculation of resistance to motion of a high-speed train using acceleration measurements in irregular coasting conditions,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 220(4), pp. 449-459.
- [7] Kwon, H.B., Kim, T.Y., Lee, D.H., Kim, M.S.(2003), “Numerical simulation of unsteady compressible flows induced by a high-speed train passing through a tunnel,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 217(2), pp. 111-124.
- [8] Maeda, T.(1993), “Effect of shape of train nose on compression wave generated by train entering tunnel,” In Proc. Int. Conf. Speed Up Technol. Railway MAGLEV Vehicles, pp. 315-319.
- [9] H.B. Kwon(2016), 하이퍼루프는 제5의 교통모드가 될 수 있을까?, Railway Journal 19(5), 2016.10, 44-53
- [10] H.B. Kwon, B.B. Kang, B.Y. Kim, D.H. Lee, H.J. Jung(2010), Parametric Study on the Aerodynamic Drag of Ultra High-speed Train in Evacuated Tube - Part 1, Journal of the Korean Society for Railway 13(1), 2010.2, 44-50.
- [11] H.B. Kwon, S.W. Nam, D.H. Kim, Y.J. Jang, B.B. Kang(2010), Parametric Study on the Aerodynamic Drag of Ultra High-speed Train in Evacuated Tube - Part 2, Journal of the Korean Society for Railway 13(1), 2010.2, 44-50.
- [12] H.M. Kang, Y.M. Jin, H.B. Kwon, K.H. Kim(2017), A Study on the Aerodynamic Drag of Transonic Vehicle in Evacuated Tube Using Computational Fluid Dynamic

- s, International Journal of Aeronautical and Space Sciences 18(4), 2017.12, 614-622.
- [13] 강영석, 박태춘, 황오식, 양수석, (2011), 다단 천음속 압축기 성능에 관한 실험적 연구, 유체기계학회 논문집, 14(6), 95-101.
- [14] 이용덕, 정진희, 이현구, 윤필현, 김길영, (2000), R134a용 터보냉동기의 원심압축기 개발 - Part 1 : 원심압축기 설계, 유체기계학회 논문집, 3(4), 44-51.
- [15] 신정관, 김경훈, 강신형(2010), HFC-134a용 원심압축기의 성능시험 및 설계방안, 설비공학논문집, 22(3), 139-148.
- [16] F. Zwicky (1948), The Morphological Method of Analysis and Construction, Interscience Publishers, New York, Courant Anniversary Volume, pp. 461-70.
- [17] Musk, E. (2013). Hyperloop alpha. SpaceX: Hawthorne, CA, USA.

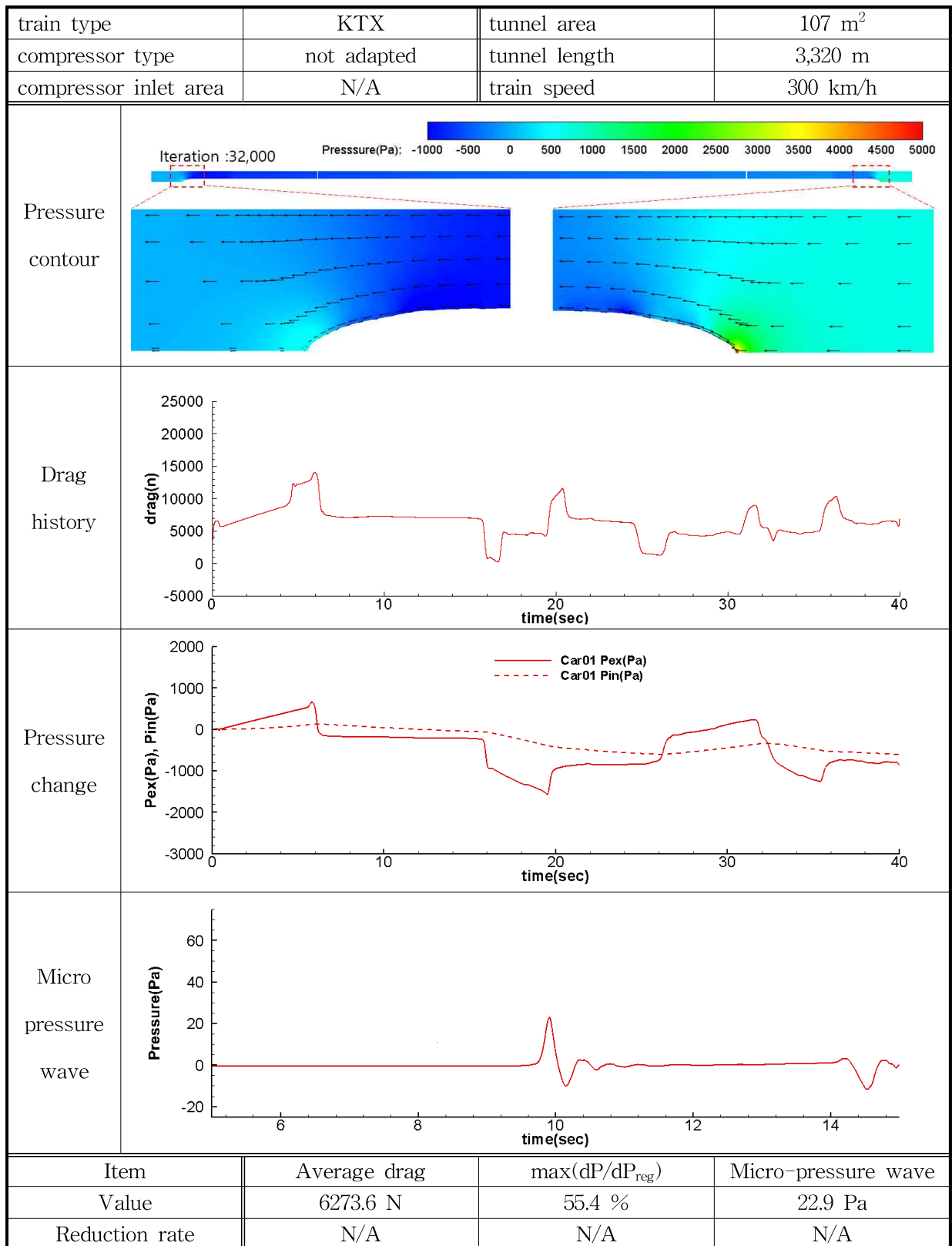
[부록] 해석 Case 별 결과

□ Case 별 해석 조건

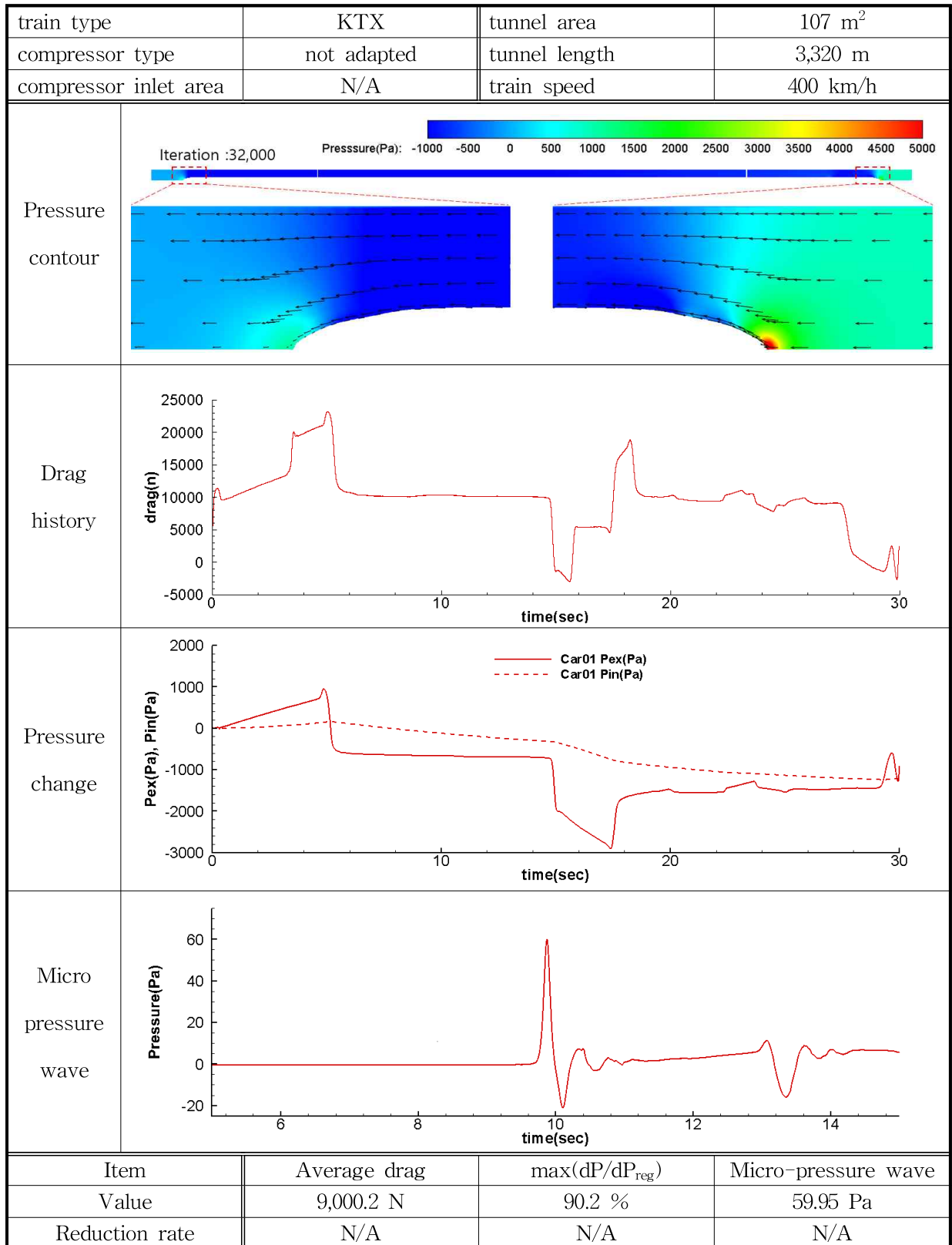
case name	열차 종류	열차속도	설계개념	흡입/배출 구 면적	터널 길이
V101-T101-S300	KTX	300 km/h	압축기 미적용	N/A	1 km
V101-T101-S400	KTX	400 km/h	압축기 미적용	N/A	1 km
V111-T101-S300	KTX	400 km/h	설계개념 1	10 %	1 km
V201-T201-S400	KTX-산천	400 km/h	압축기 미적용1	N/A	1 km
V211-T201-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	10 %	1 km
V212-T201-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	20 %	1 km
V213-T201-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	30 %	1 km
V222-T201-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 2	20 %	1 km
V232-T201-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 3	20 %	1 km
V233-T201-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 3	20 %	1 km
V201-T202-S400	KTX-산천	400 km/h	압축기 미적용	N/A	2 km
V211-T202-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	10 %	2 km
V212-T202-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	20 %	2 km
V213-T202-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	30 %	2 km
V201-T203-S400	KTX-산천	400 km/h	압축기 미적용	N/A	3 km
V211-T203-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	10 %	3 km
V212-T203-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	20 %	3 km
V213-T203-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	30 %	3 km
V201-T204-S400	KTX-산천	400 km/h	압축기 미적용	N/A	4 km
V211-T204-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	10 %	4 km
V212-T204-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	20 %	4 km
V213-T204-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	30 %	4 km
V201-T205-S400	KTX-산천	400 km/h	압축기 미적용	N/A	5 km
V211-T205-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	10 %	5 km
V212-T205-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	20 %	5 km
V213-T205-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	30 %	5 km
V213-1-T205-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	30 %	5 km
V213-2-T205-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	30 %	5 km
V213-3-T205-S400	KTX-산천	400 km/h	설계개념 1	30 %	5 km
V201-T201-S350	KTX-산천	350 km/h	압축기 미적용1	N/A	1 km
V211-T201-S350	KTX-산천	350 km/h	설계개념 1	10 %	1 km
V212-T201-S350	KTX-산천	350 km/h	설계개념 1	20 %	1 km
V213-T201-S350	KTX-산천	350 km/h	설계개념 1	30 %	1 km

case name	열차 종류	열차속도	설계개념	흡입/배출 구 면적	터널 길이
V201-T202-S350	KTX-산천	350 km/h	압축기 미적용	N/A	2 km
V211-T202-S350	KTX-산천	350 km/h	설계개념 1	10 %	2 km
V212-T202-S350	KTX-산천	350 km/h	설계개념 1	20 %	2 km
V213-T202-S350	KTX-산천	350 km/h	설계개념 1	30 %	2 km
V201-T203-S350	KTX-산천	350 km/h	압축기 미적용	N/A	3 km
V211-T203-S350	KTX-산천	350 km/h	설계개념 1	10 %	3 km
V212-T203-S350	KTX-산천	350 km/h	설계개념 1	20 %	3 km
V213-T203-S350	KTX-산천	350 km/h	설계개념 1	30 %	3 km
V201-T204-S350	KTX-산천	350 km/h	압축기 미적용	N/A	4 km
V211-T204-S350	KTX-산천	350 km/h	설계개념 1	10 %	4 km
V212-T204-S350	KTX-산천	350 km/h	설계개념 1	20 %	4 km
V213-T204-S350	KTX-산천	350 km/h	설계개념 1	30 %	4 km
V201-T205-S350	KTX-산천	350 km/h	압축기 미적용	N/A	5 km
V211-T205-S350	KTX-산천	350 km/h	설계개념 1	10 %	5 km
V212-T205-S350	KTX-산천	350 km/h	설계개념 1	20 %	5 km
V213-T205-S350	KTX-산천	350 km/h	설계개념 1	30 %	5 km
V201-T201-S300	KTX-산천	300 km/h	압축기 미적용1	N/A	1 km
V211-T201-S300	KTX-산천	300 km/h	설계개념 1	10 %	1 km
V212-T201-S300	KTX-산천	300 km/h	설계개념 1	20 %	1 km
V213-T201-S300	KTX-산천	300 km/h	설계개념 1	30 %	1 km
V201-T202-S300	KTX-산천	300 km/h	압축기 미적용	N/A	2 km
V211-T202-S300	KTX-산천	300 km/h	설계개념 1	10 %	2 km
V212-T202-S300	KTX-산천	300 km/h	설계개념 1	20 %	2 km
V213-T202-S300	KTX-산천	300 km/h	설계개념 1	30 %	2 km
V201-T203-S300	KTX-산천	300 km/h	압축기 미적용	N/A	3 km
V211-T203-S300	KTX-산천	300 km/h	설계개념 1	10 %	3 km
V212-T203-S300	KTX-산천	300 km/h	설계개념 1	20 %	3 km
V213-T203-S300	KTX-산천	300 km/h	설계개념 1	30 %	3 km
V201-T204-S300	KTX-산천	300 km/h	압축기 미적용	N/A	4 km
V211-T204-S300	KTX-산천	300 km/h	설계개념 1	10 %	4 km
V212-T204-S300	KTX-산천	300 km/h	설계개념 1	20 %	4 km
V213-T204-S300	KTX-산천	300 km/h	설계개념 1	30 %	4 km
V201-T205-S300	KTX-산천	300 km/h	압축기 미적용	N/A	5 km
V211-T205-S300	KTX-산천	300 km/h	설계개념 1	10 %	5 km
V212-T205-S300	KTX-산천	300 km/h	설계개념 1	20 %	5 km
V213-T205-S300	KTX-산천	300 km/h	설계개념 1	30 %	5 km

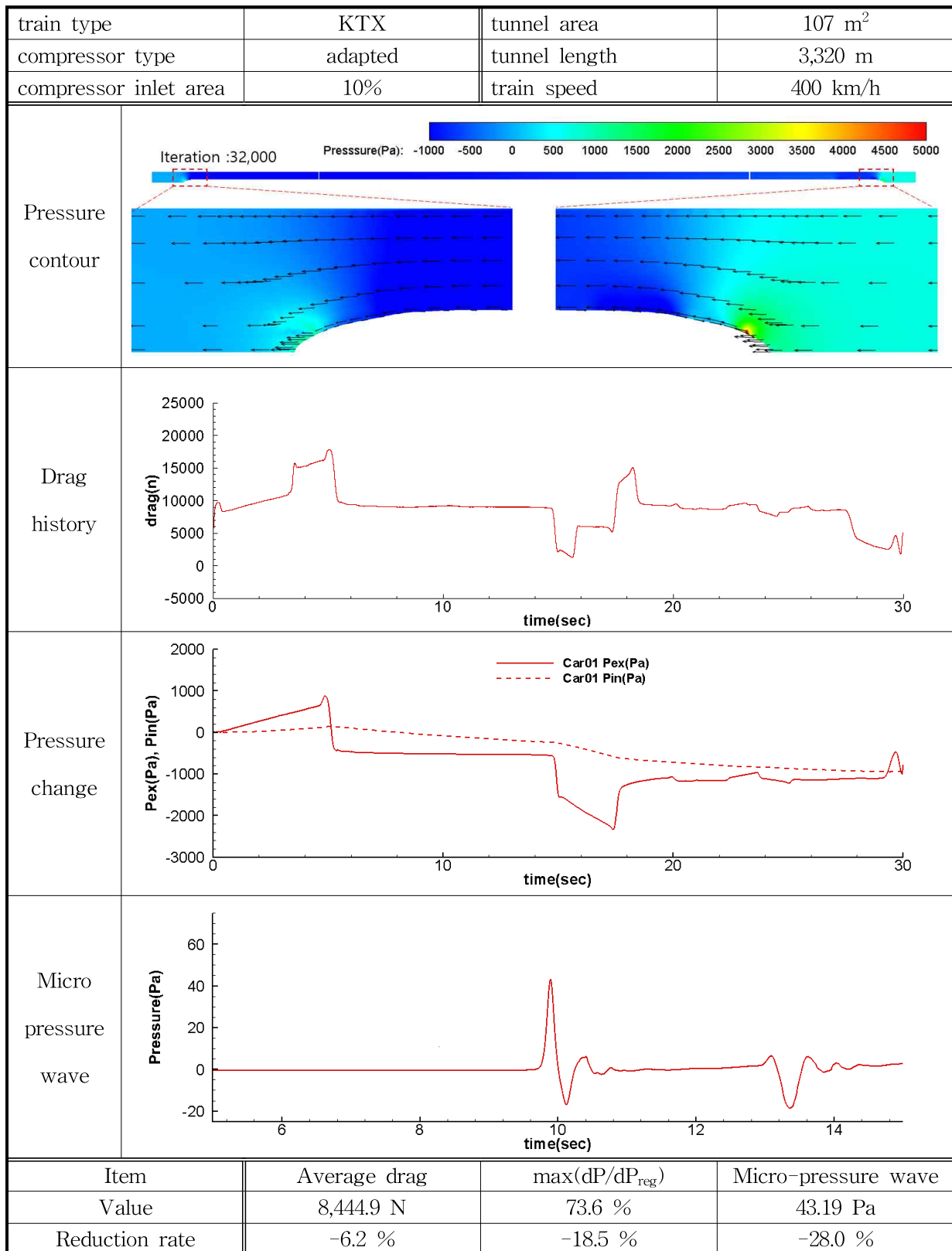
□ Case name : V101-T101-S300



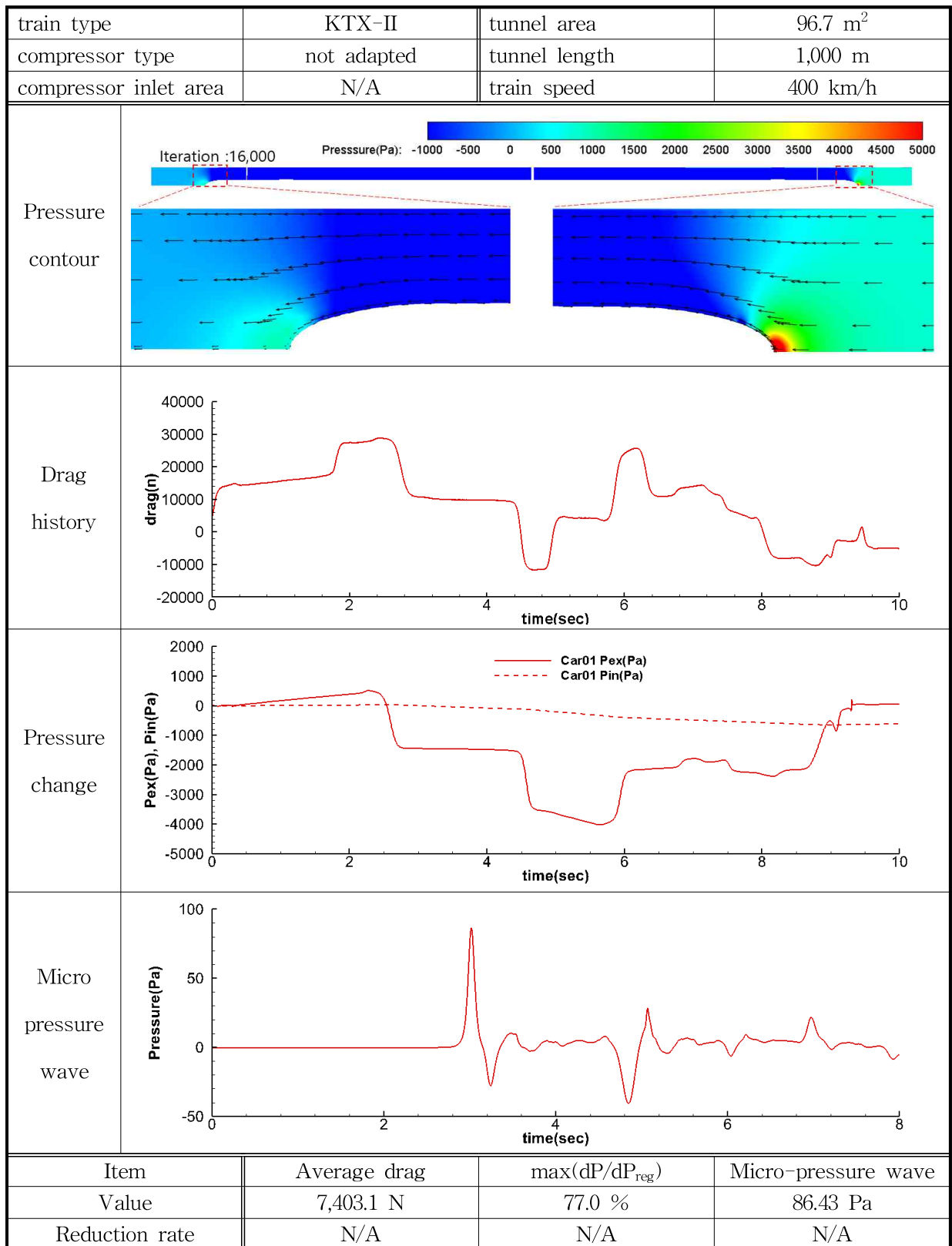
□ Case name : V101-T101-S400



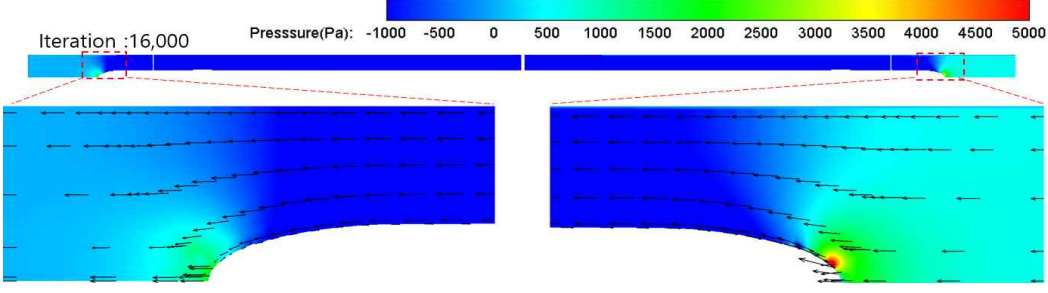
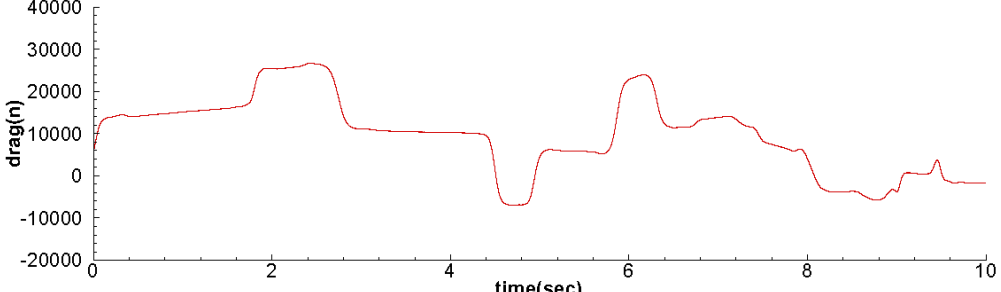
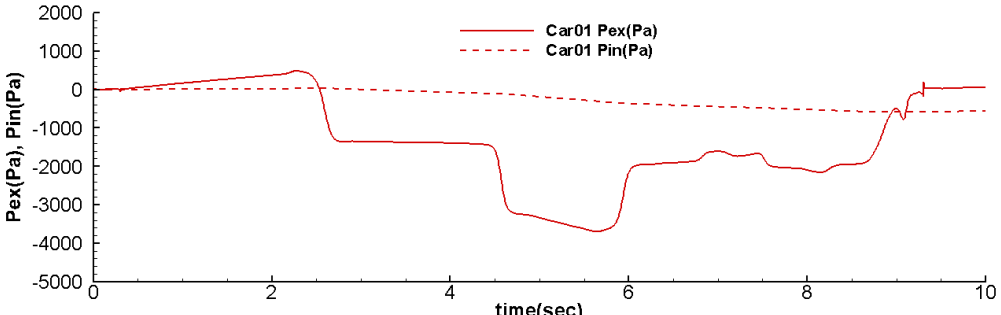
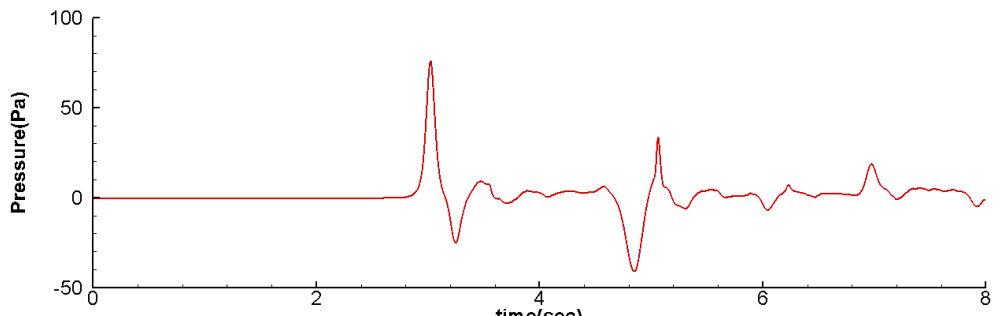
□ Case name : V111-T101-S400



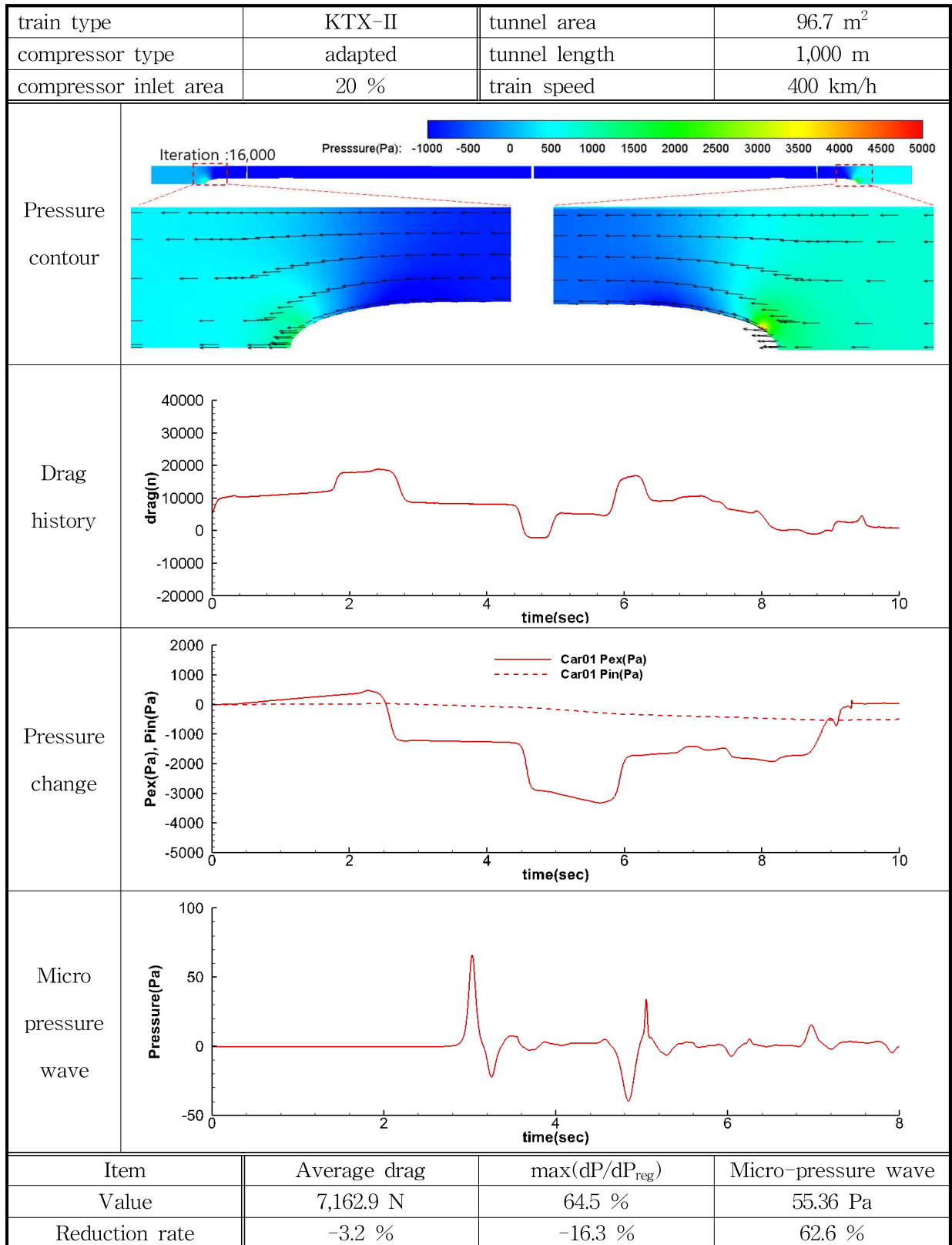
□ Case name : V201-T201-S400



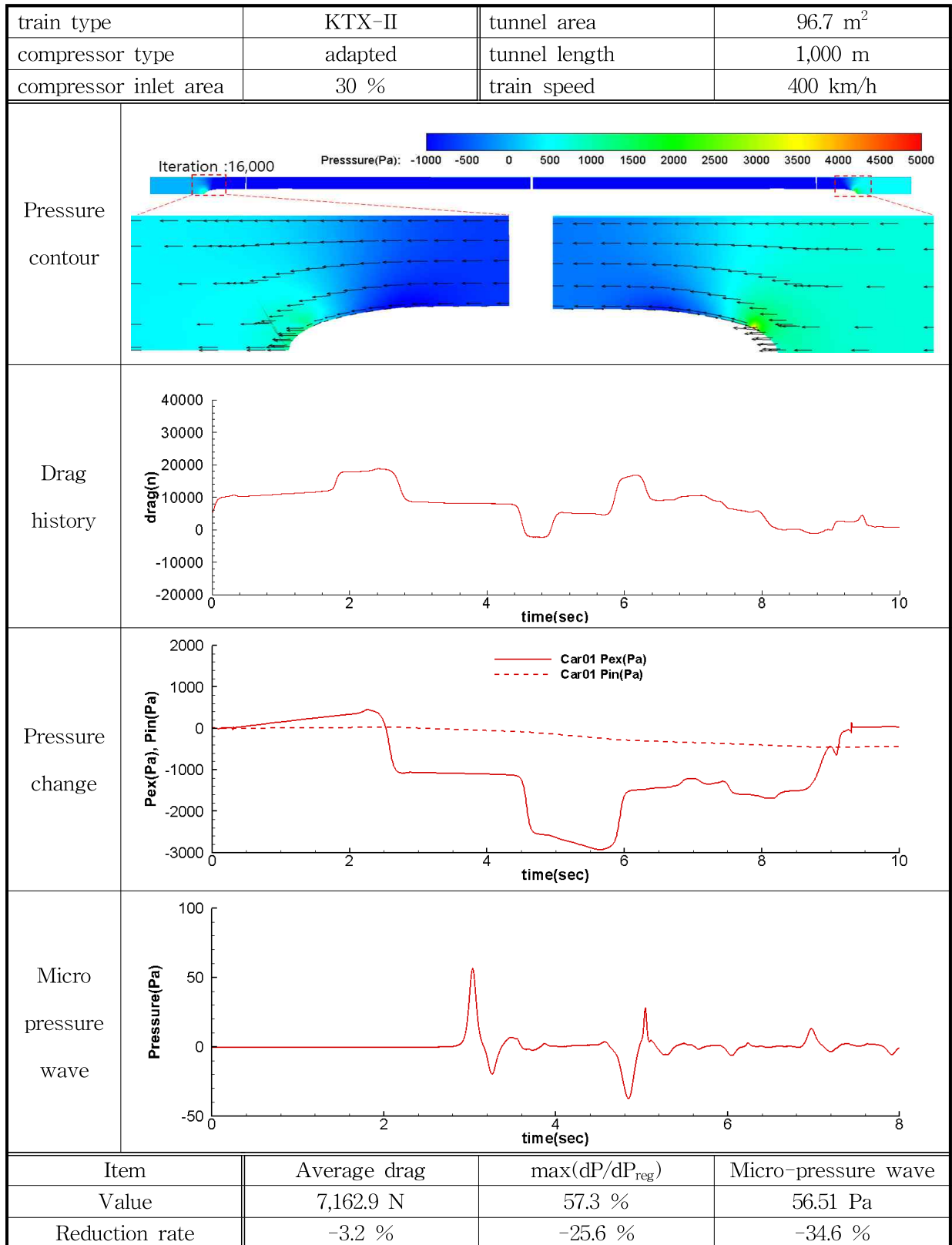
□ Case name : V211-T201-S400

train type	KTX-II	tunnel area	96.7 m ²
compressor type	adapted	tunnel length	1,000 m
compressor inlet area	10 %	train speed	400 km/h
Pressure contour			
Drag history			
Pressure change			
Micro pressure wave			
Item	Average drag	max(dP/dP _{reg})	Micro-pressure wave
Value	8,590.2 N	71.3 %	75.93 Pa
Reduction rate	16.0 %	-7.4 %	-12.2 %

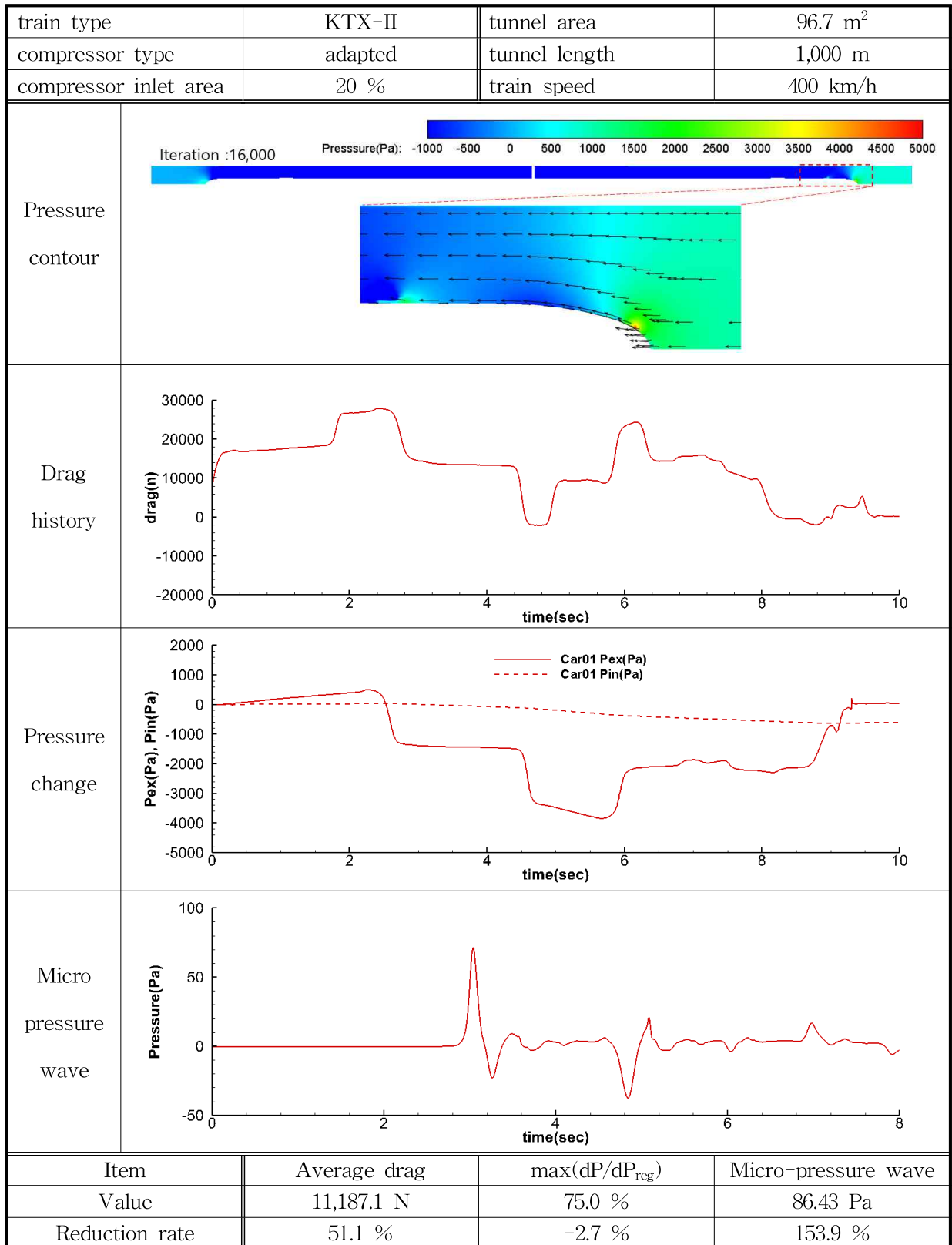
□ Case name : V212-T201-S400



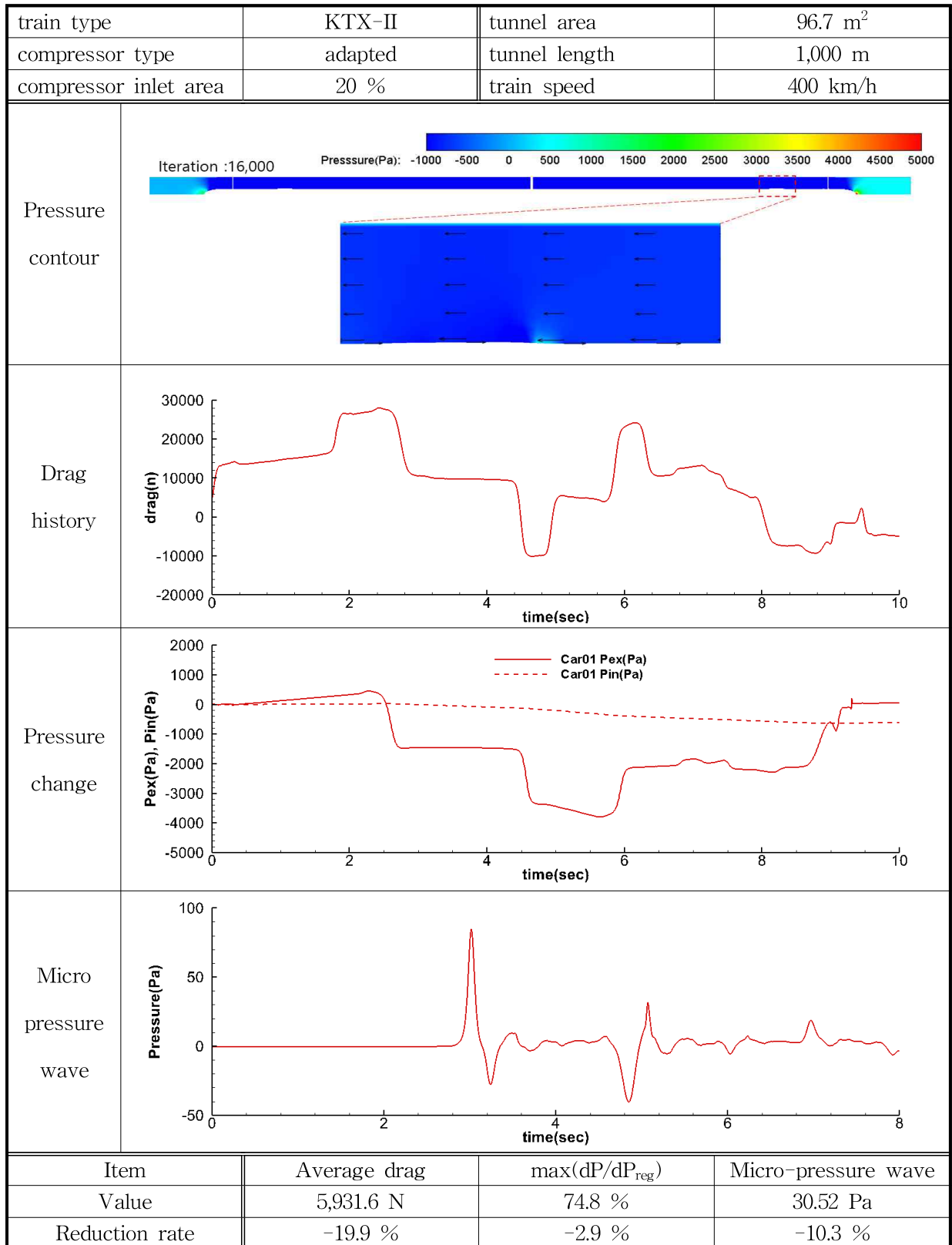
□ Case name : V213-T201-S400



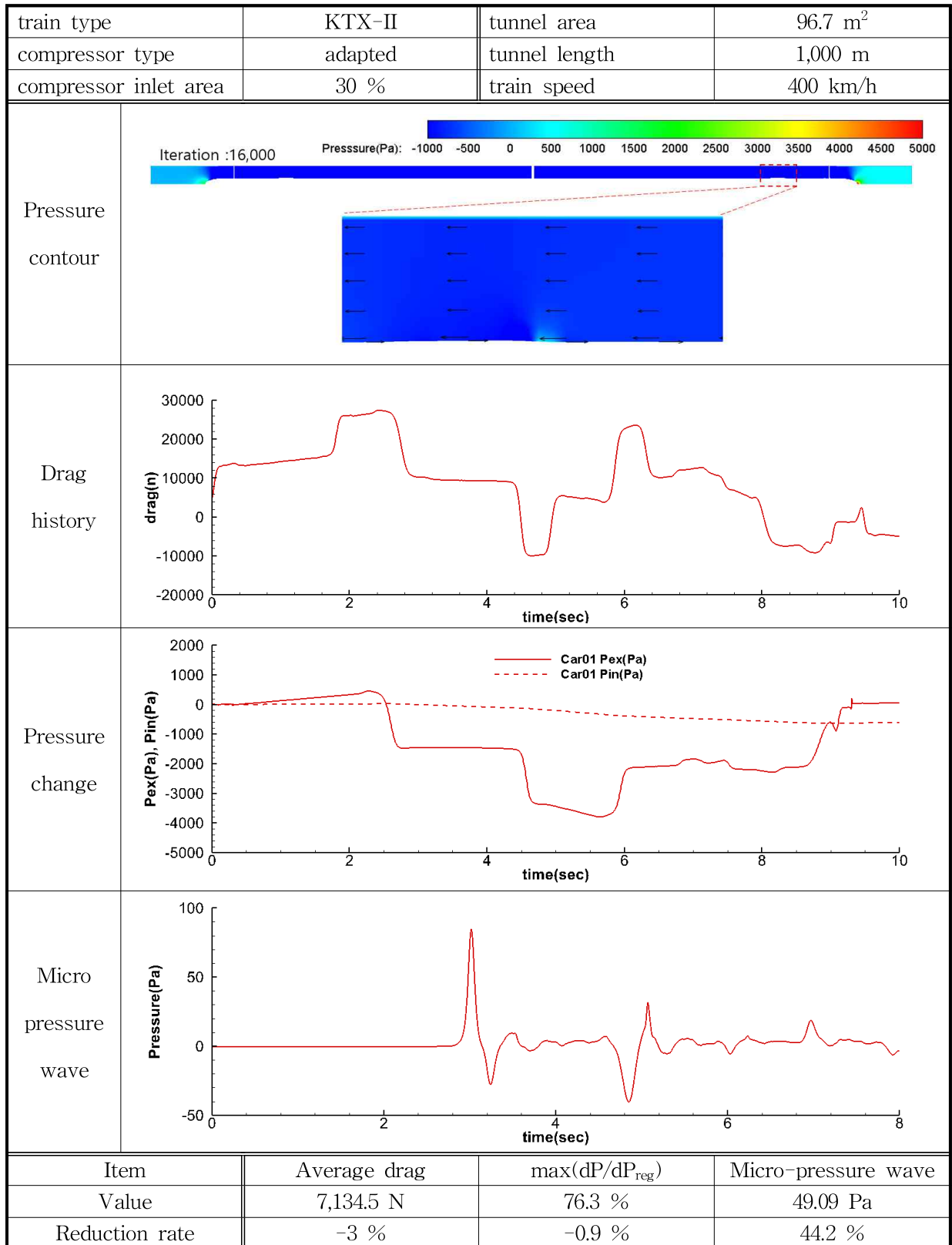
□ Case name : V222-T201-S400



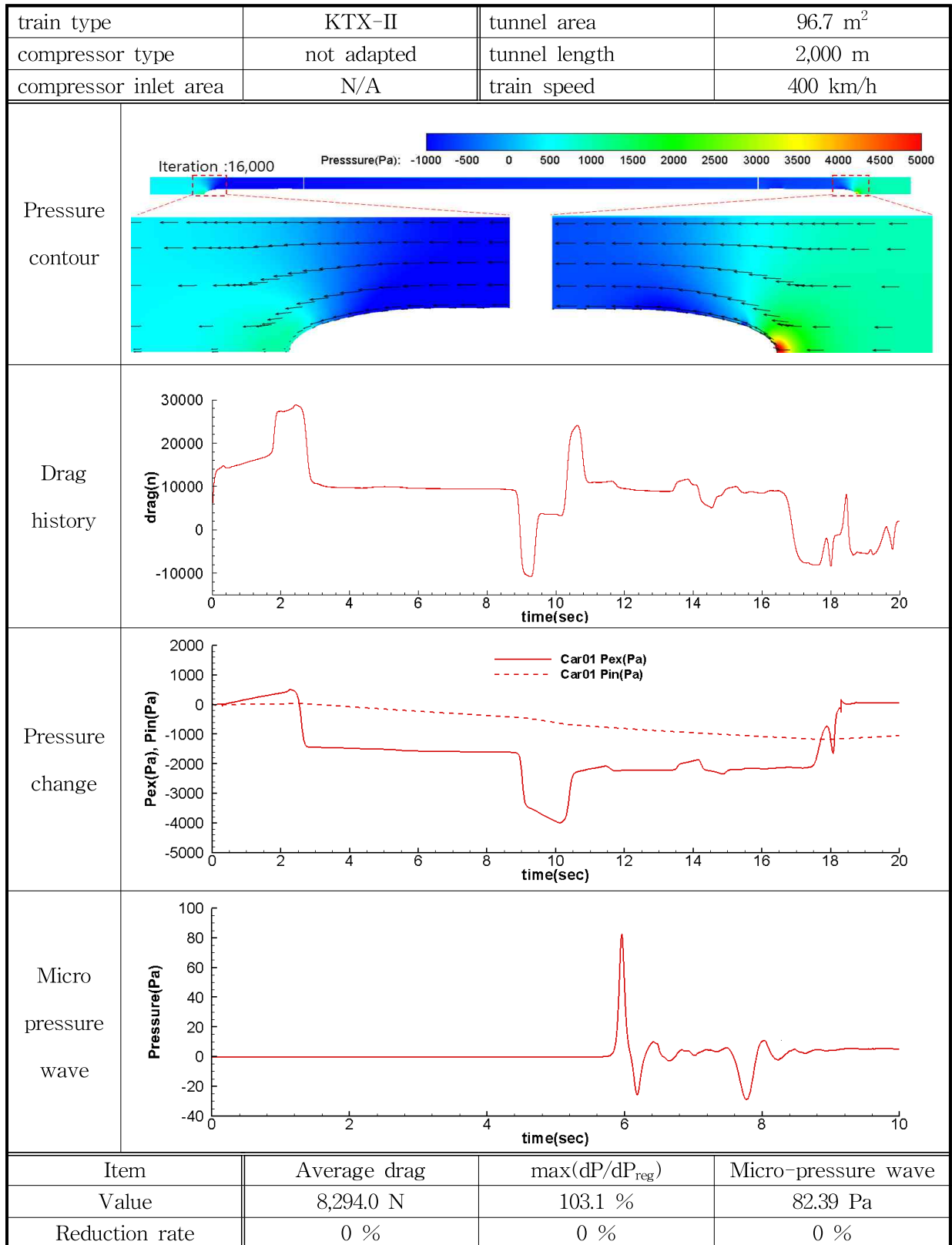
□ Case name : V232-T201-S400



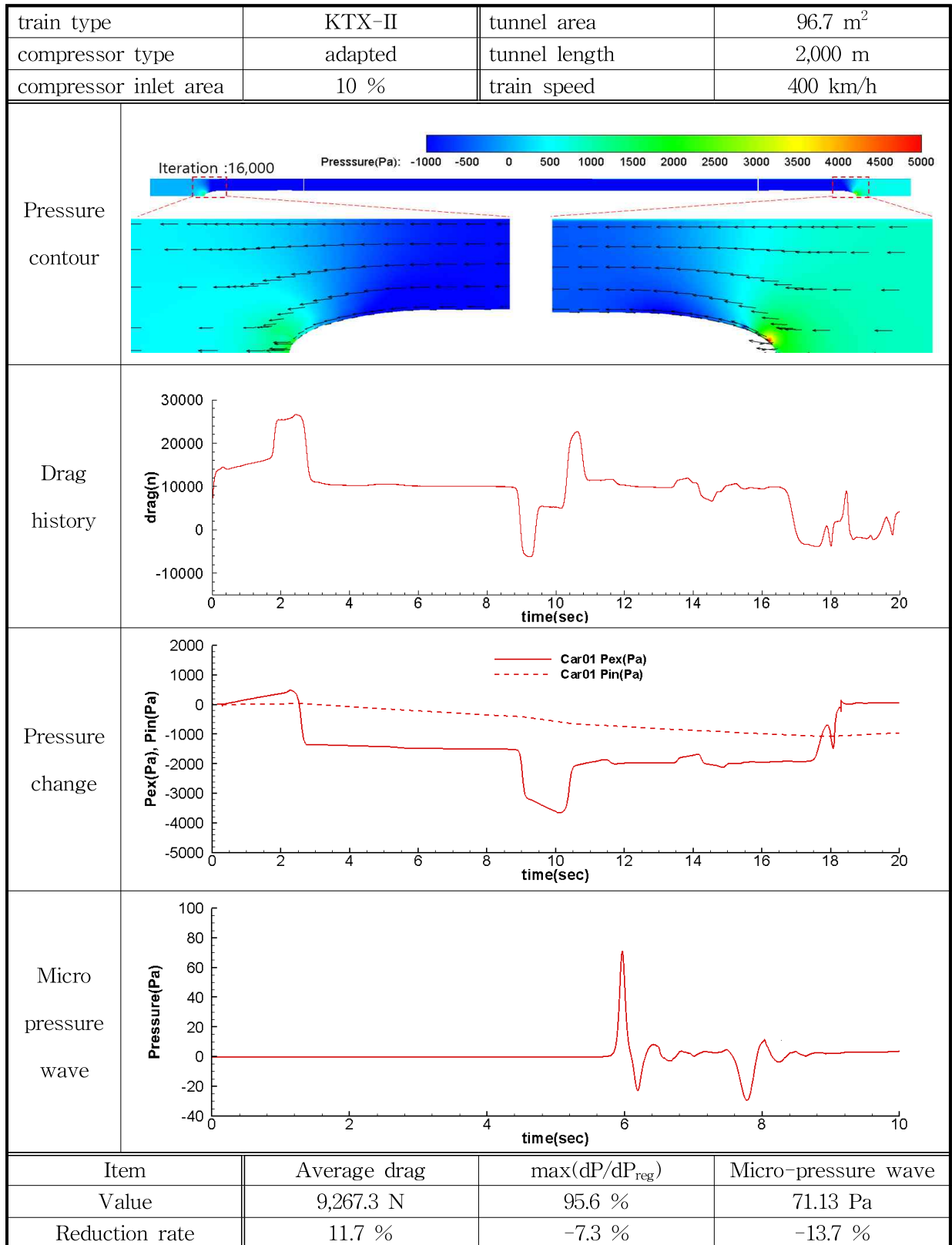
□ Case name : V233-T201-S400



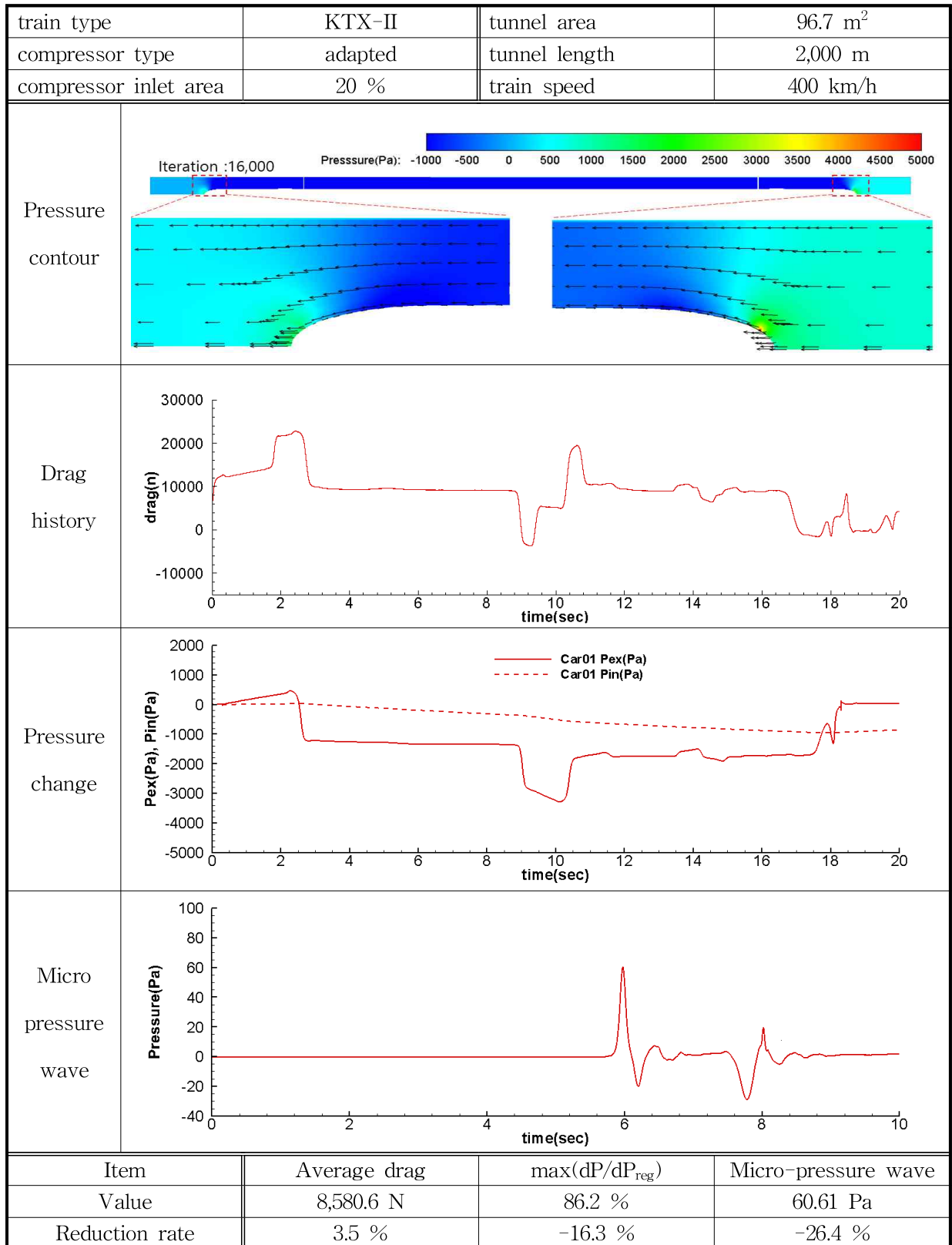
□ Case name : V201-T202-S400



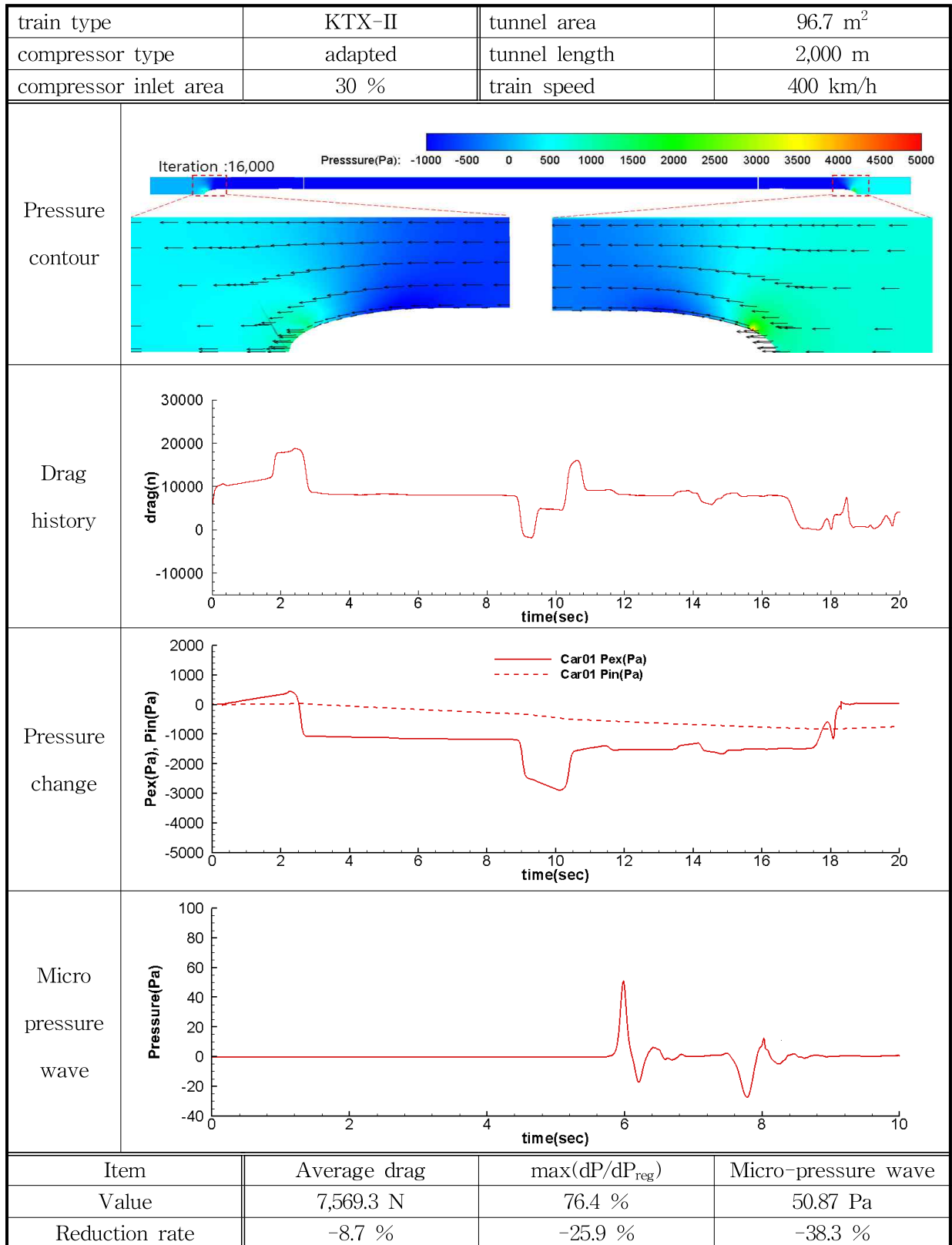
□ Case name : V211-T202-S400



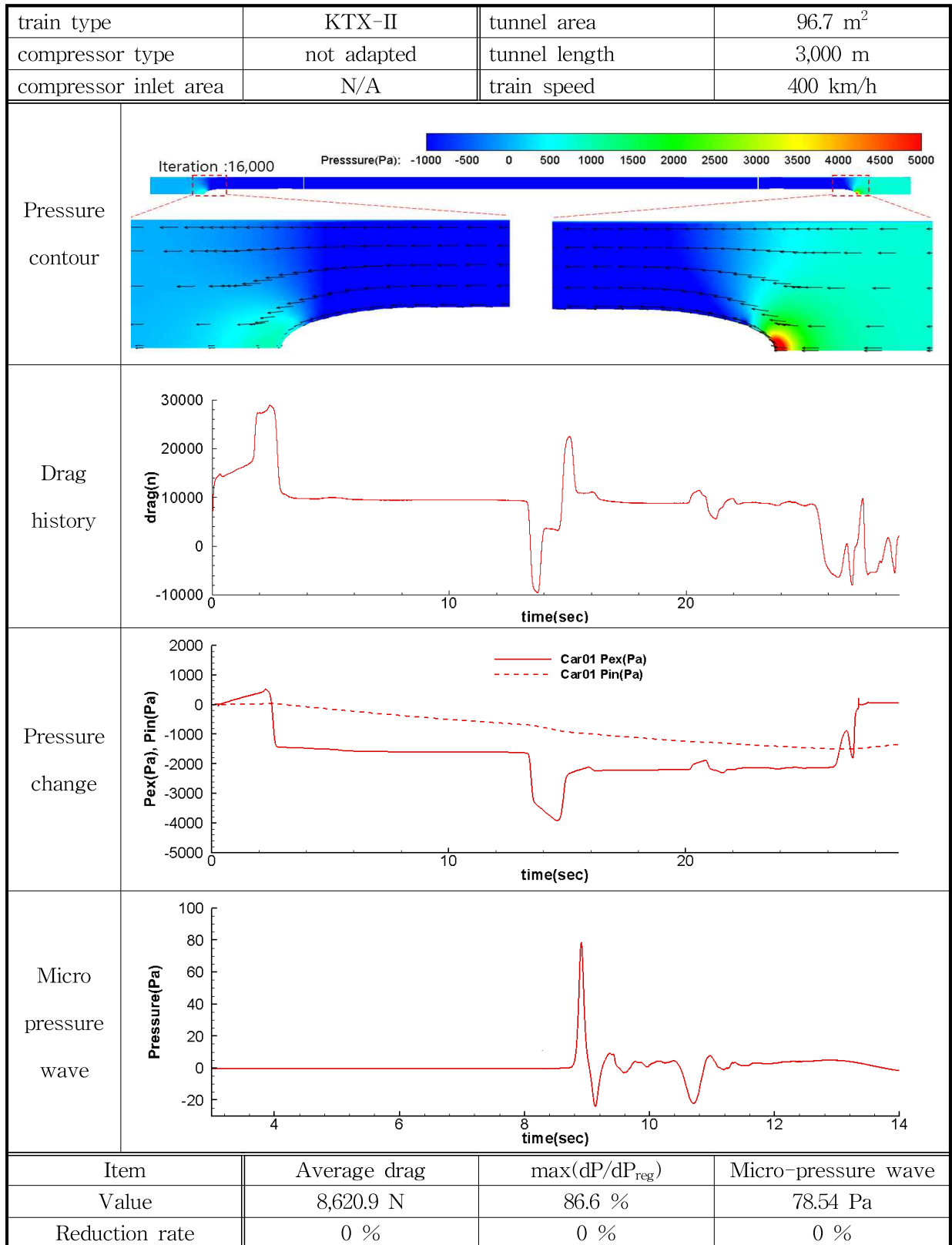
□ Case name : V212-T202-S400



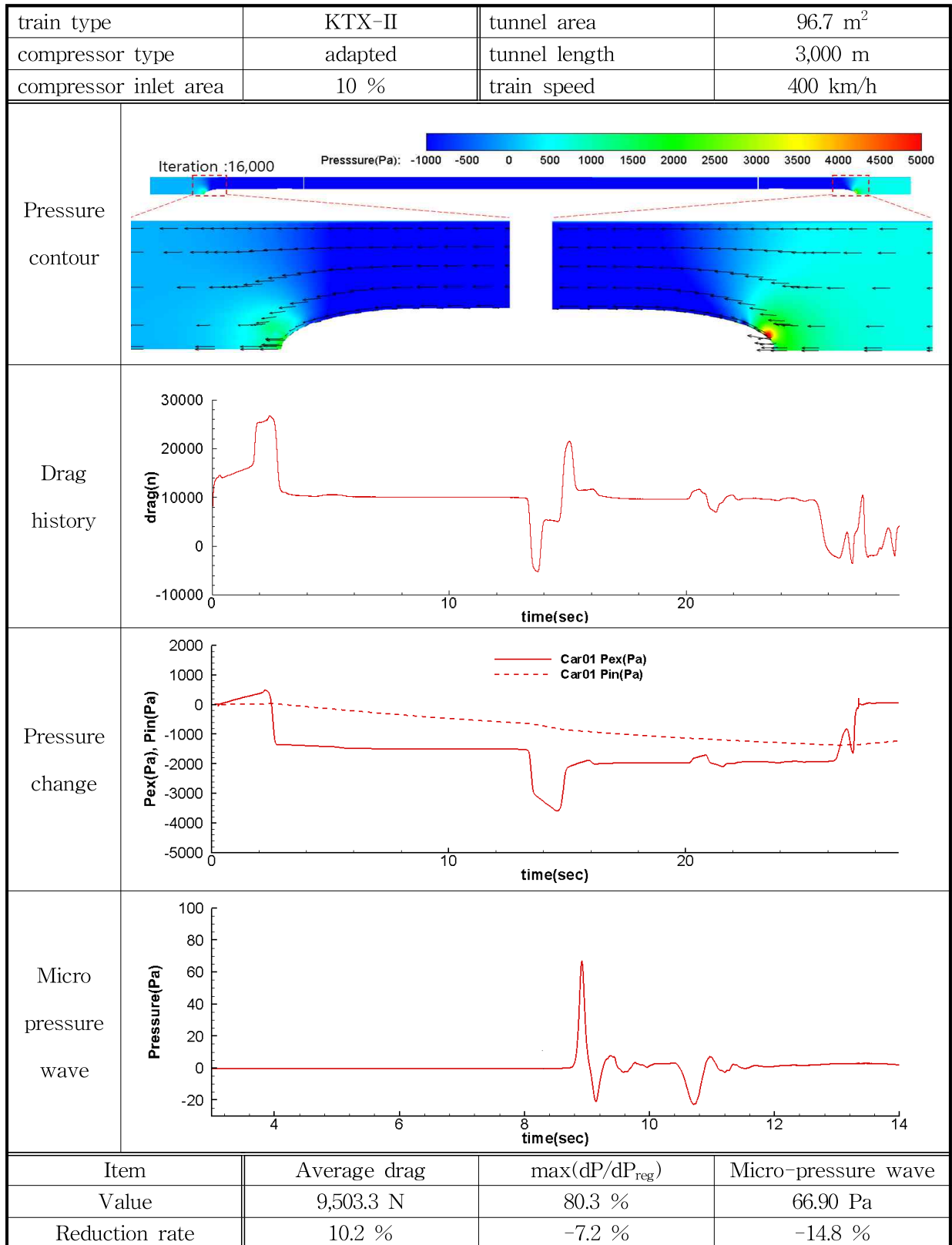
□ Case name : V213-T202-S400



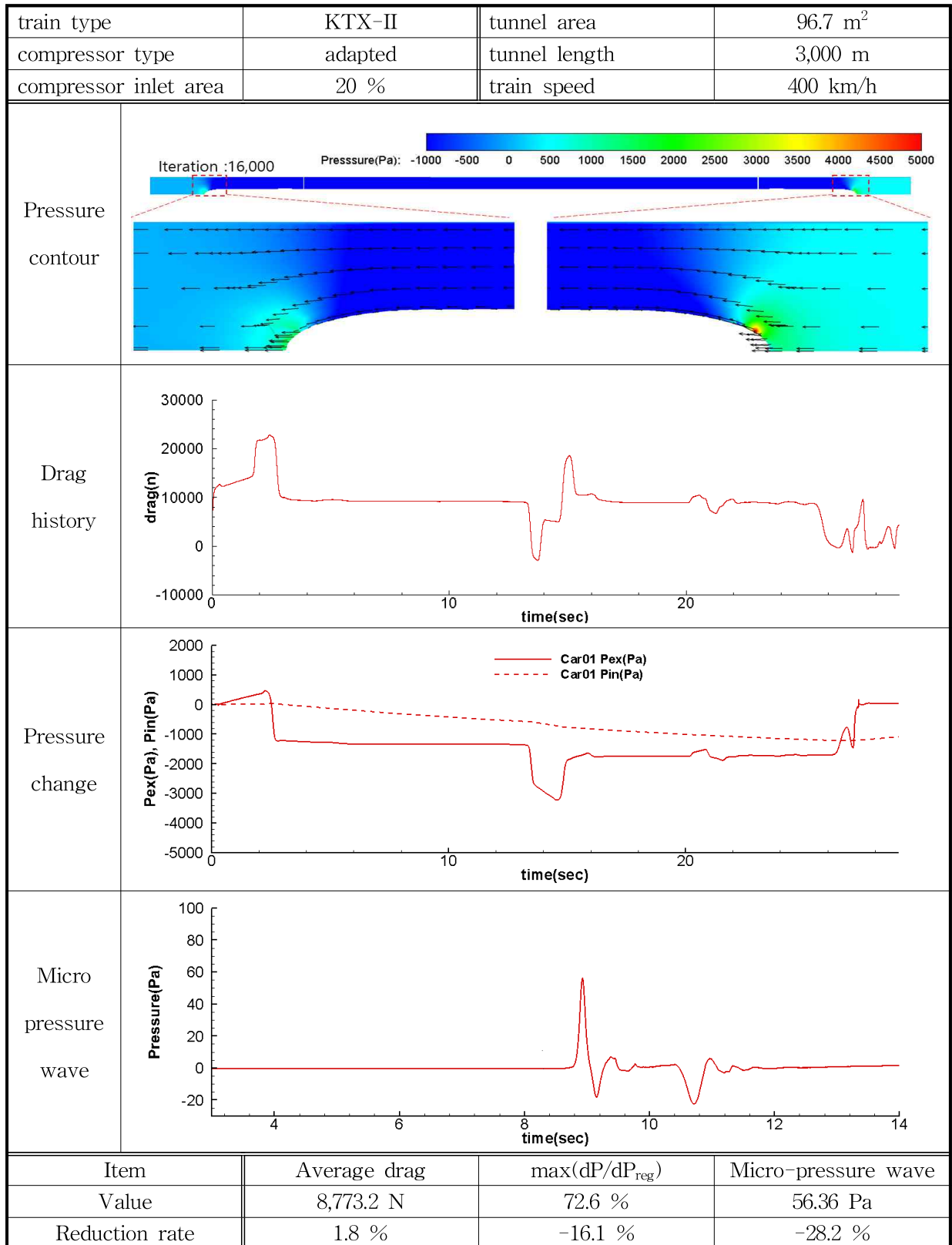
□ Case name : V201-T203-S400



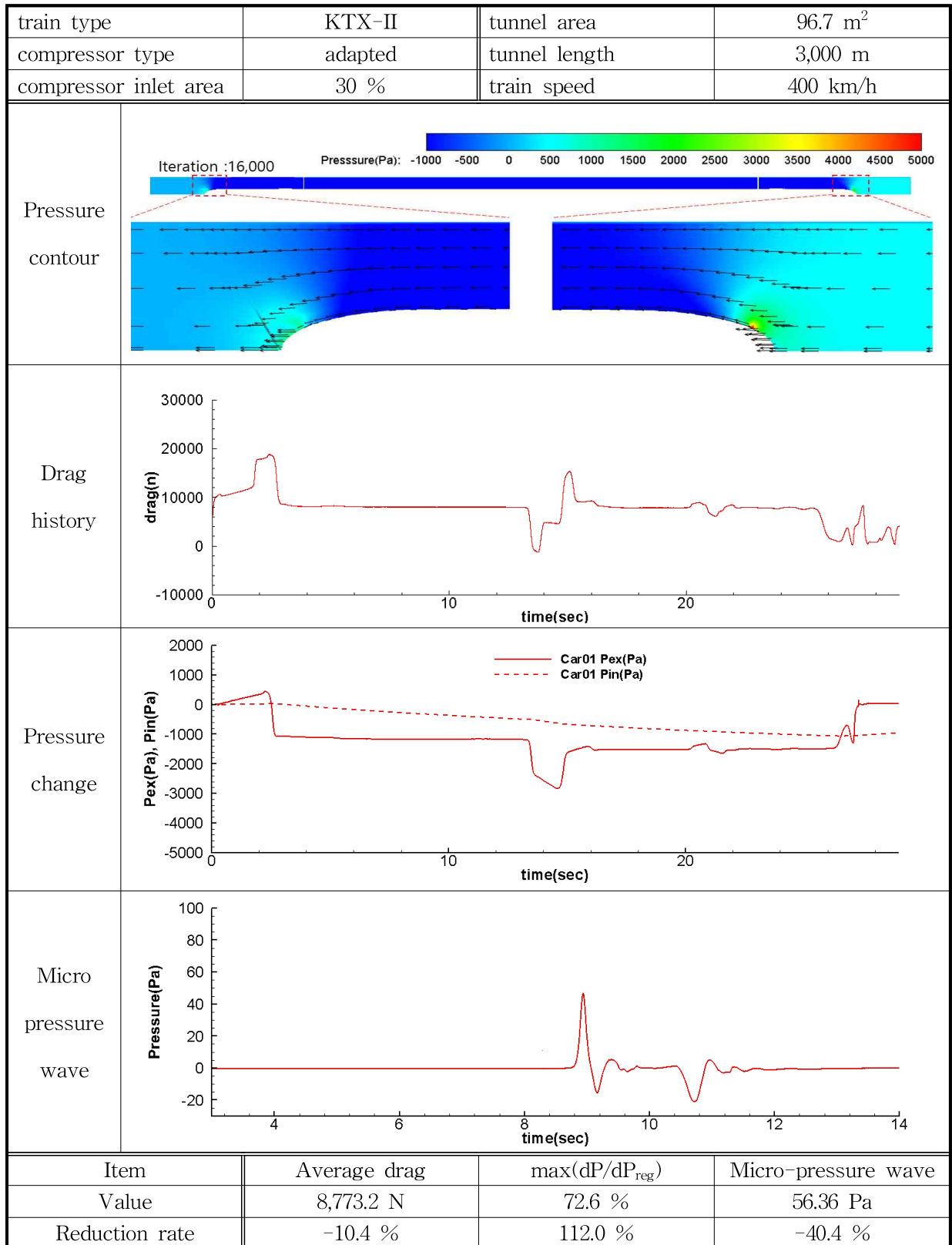
□ Case name : V211-T203-S400



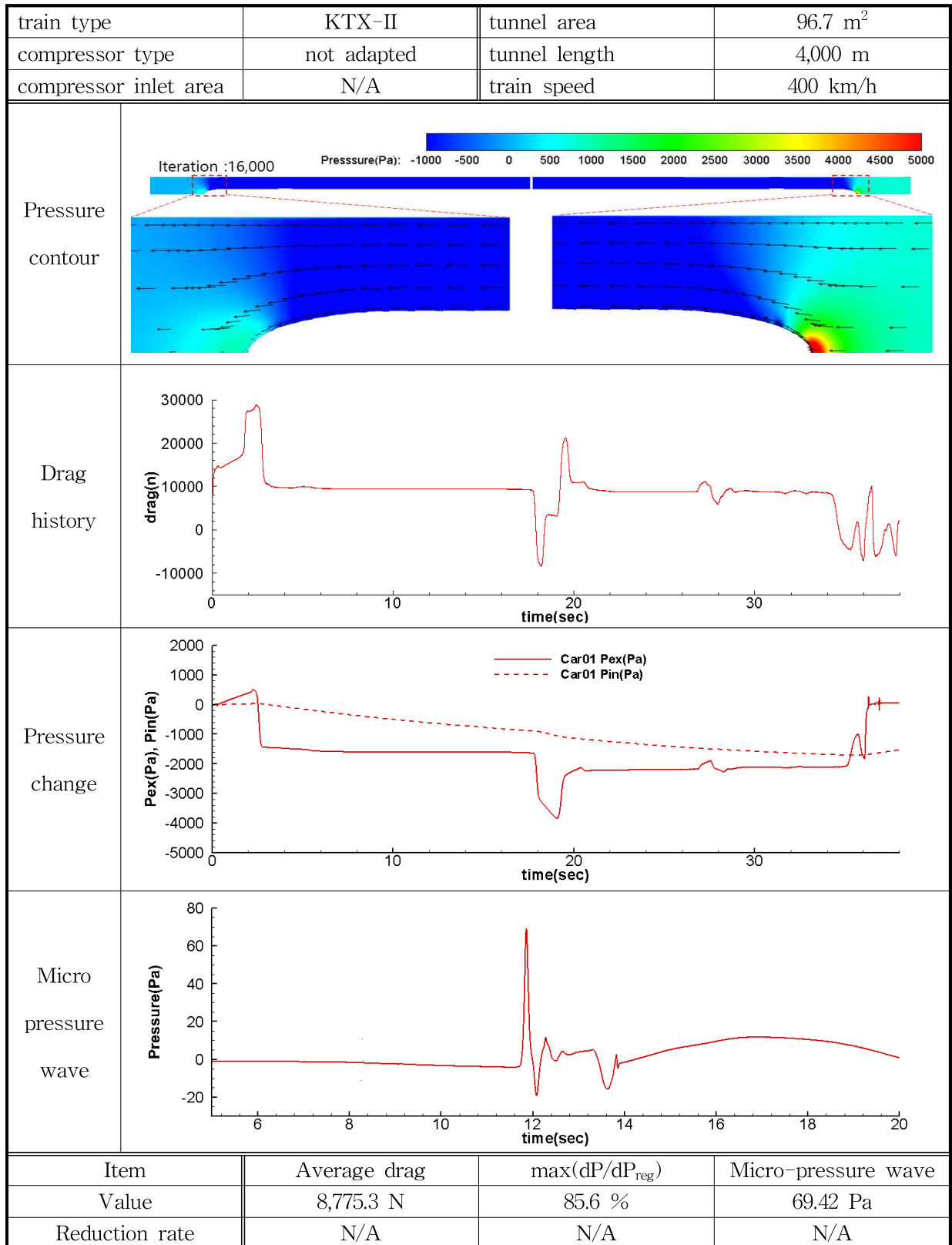
□ Case name : V212-T203-S400



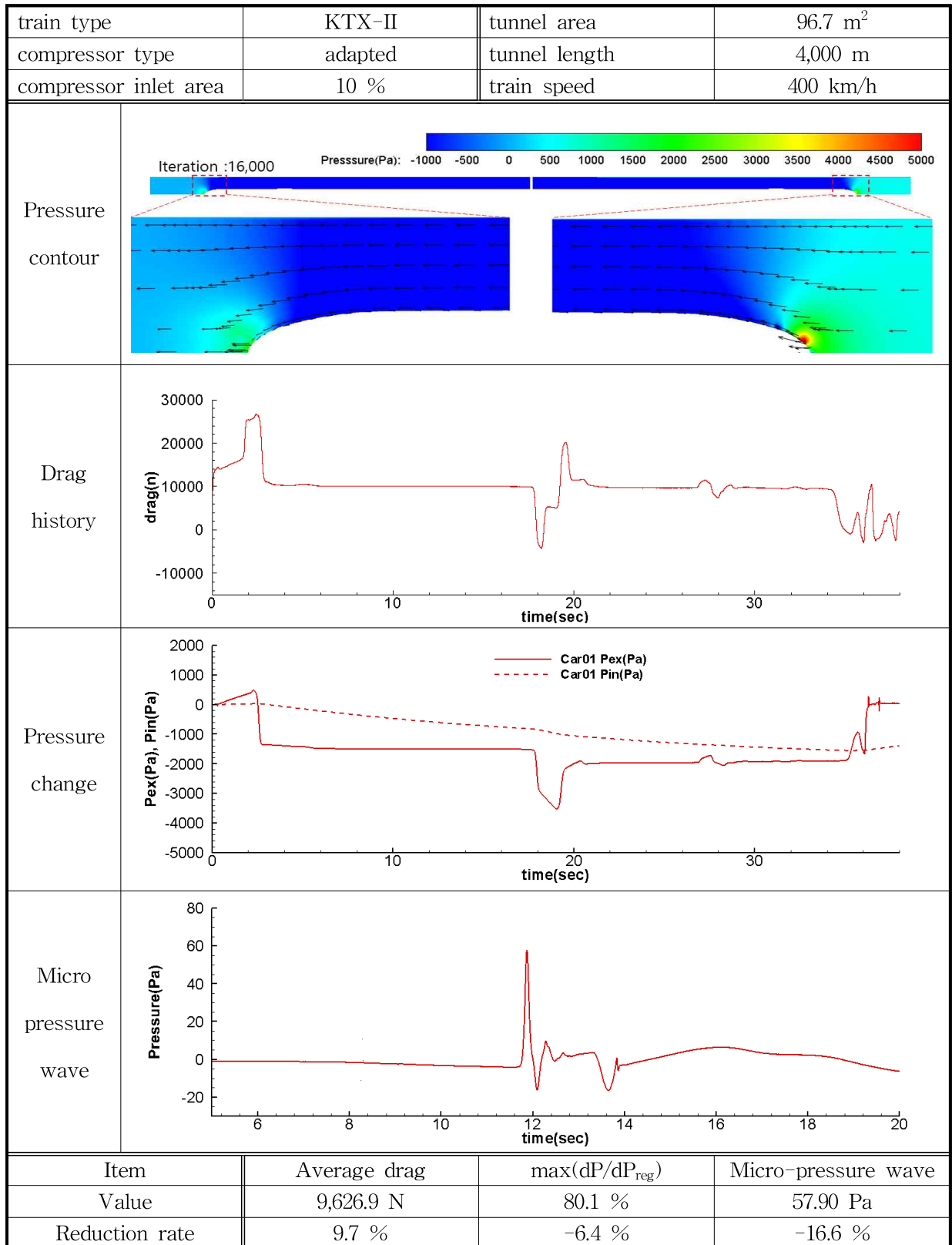
□ Case name : V213-T203-S400



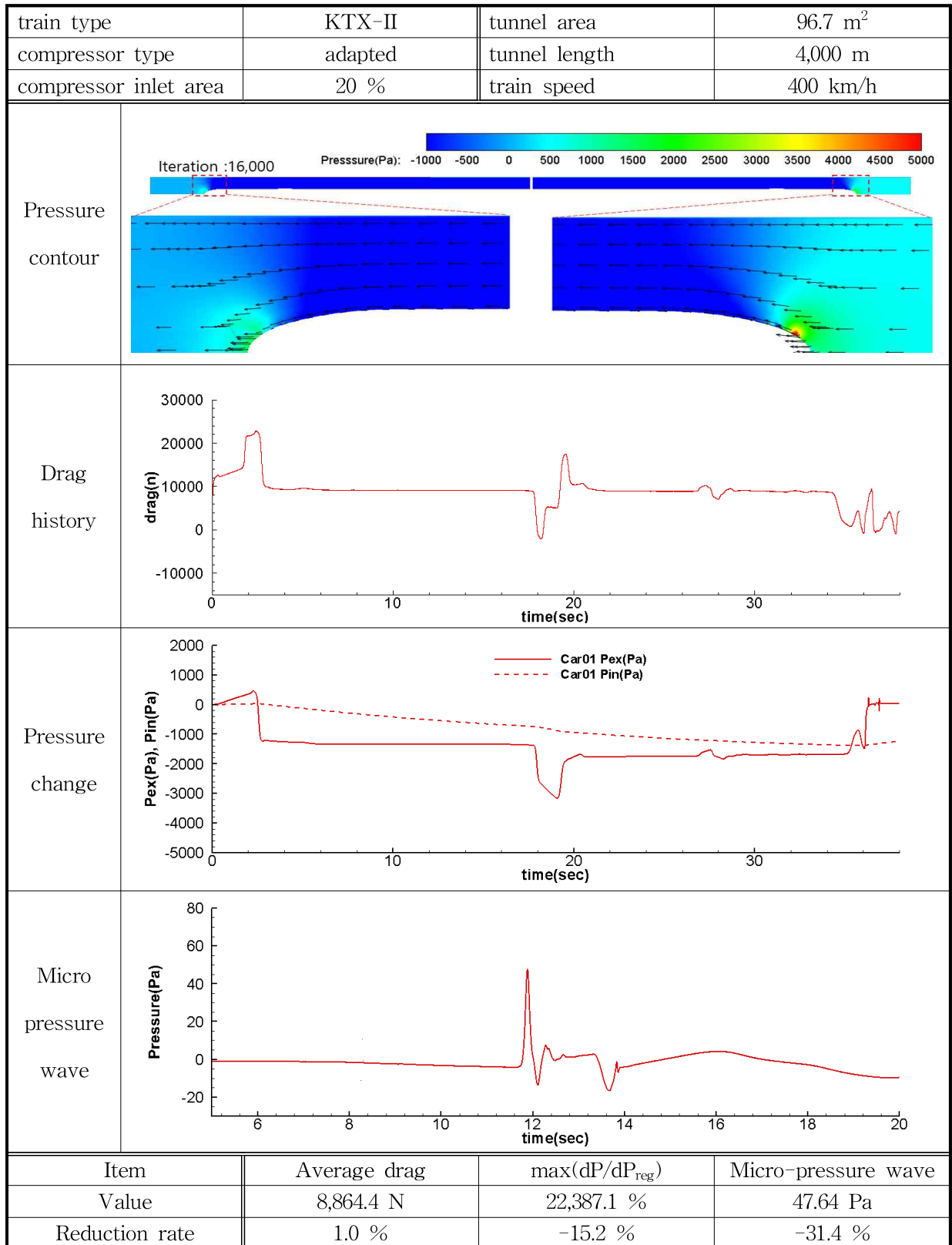
□ Case name : V201-T204-S400



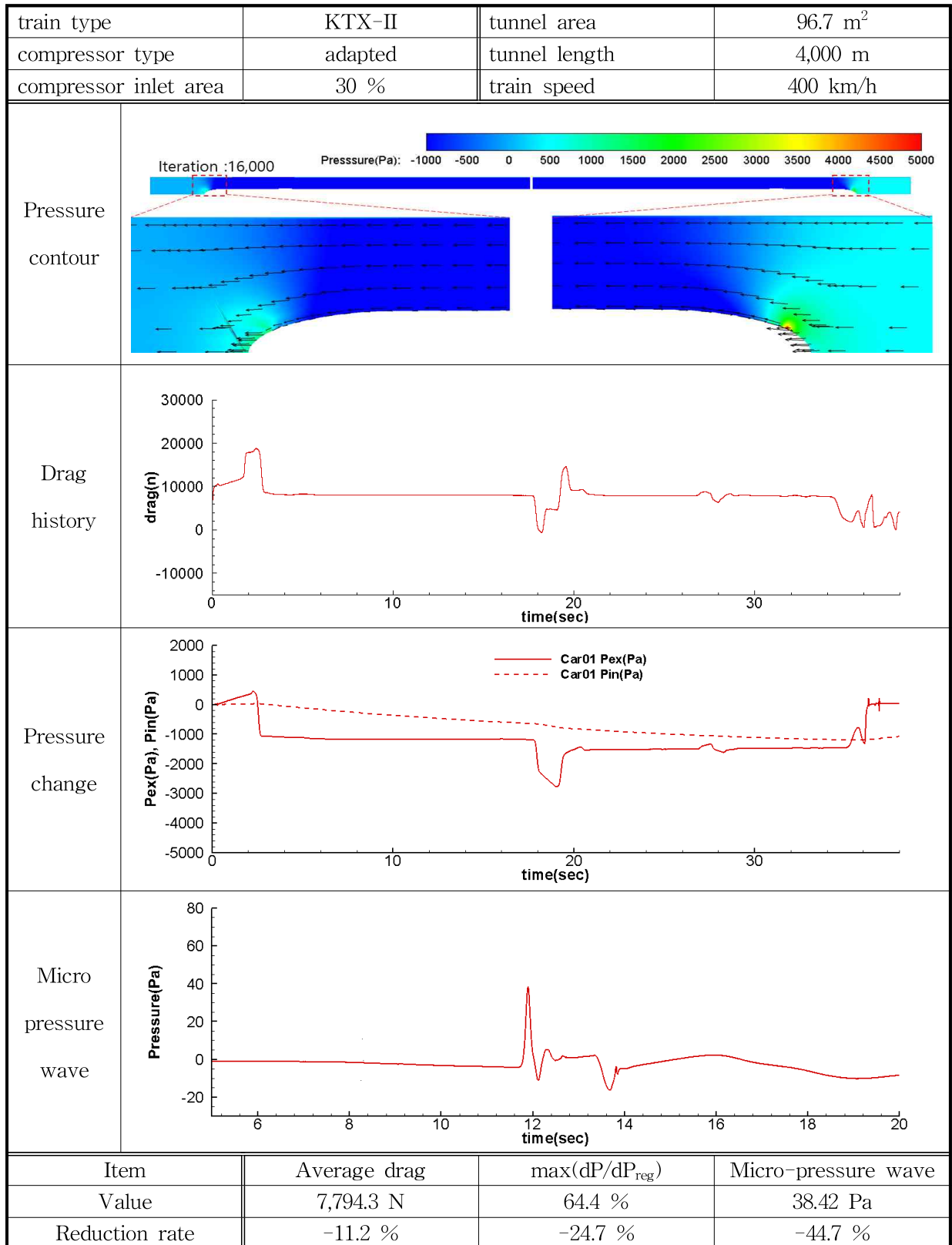
□ Case name : V211-T204-S400



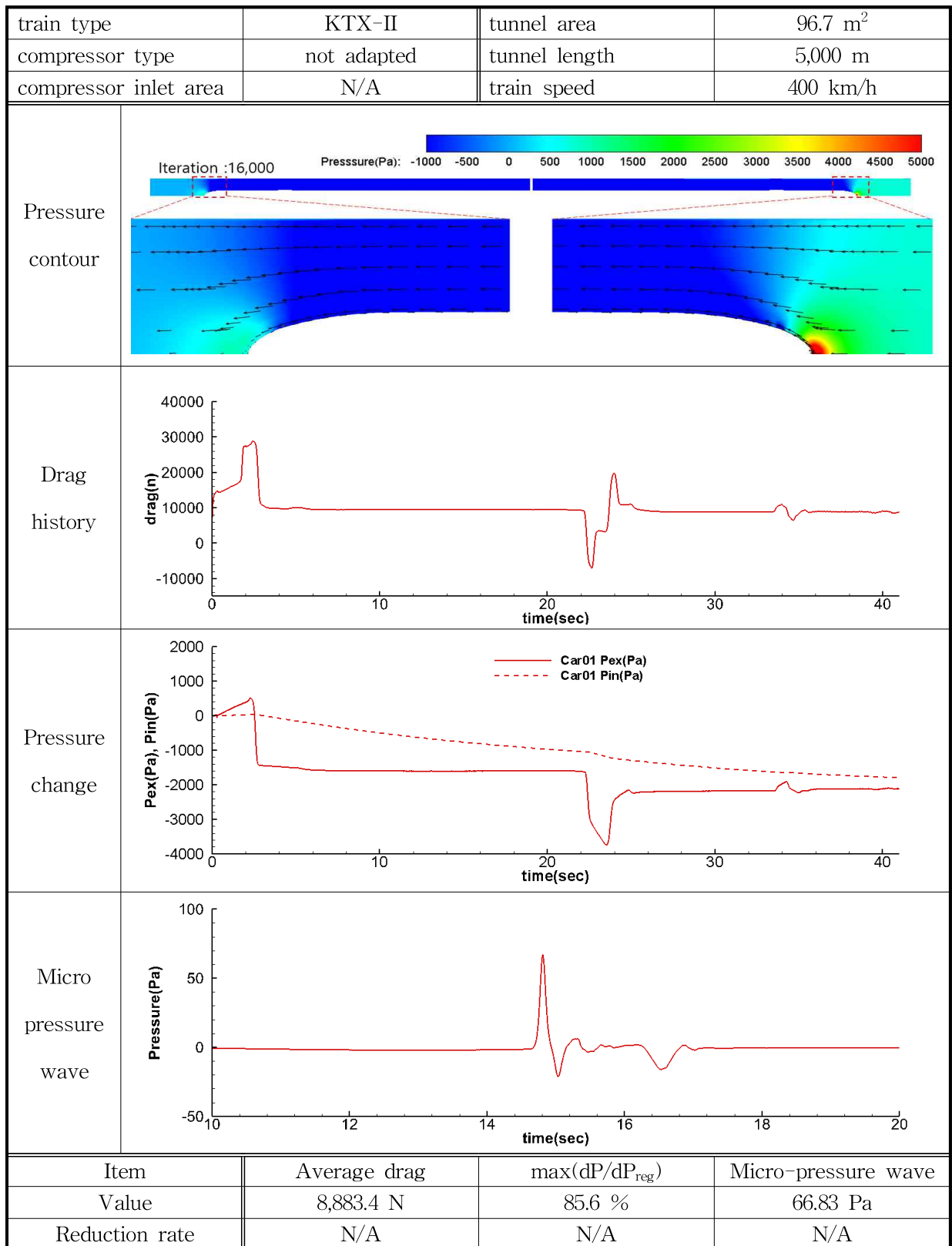
□ Case name : V212-T204-S400



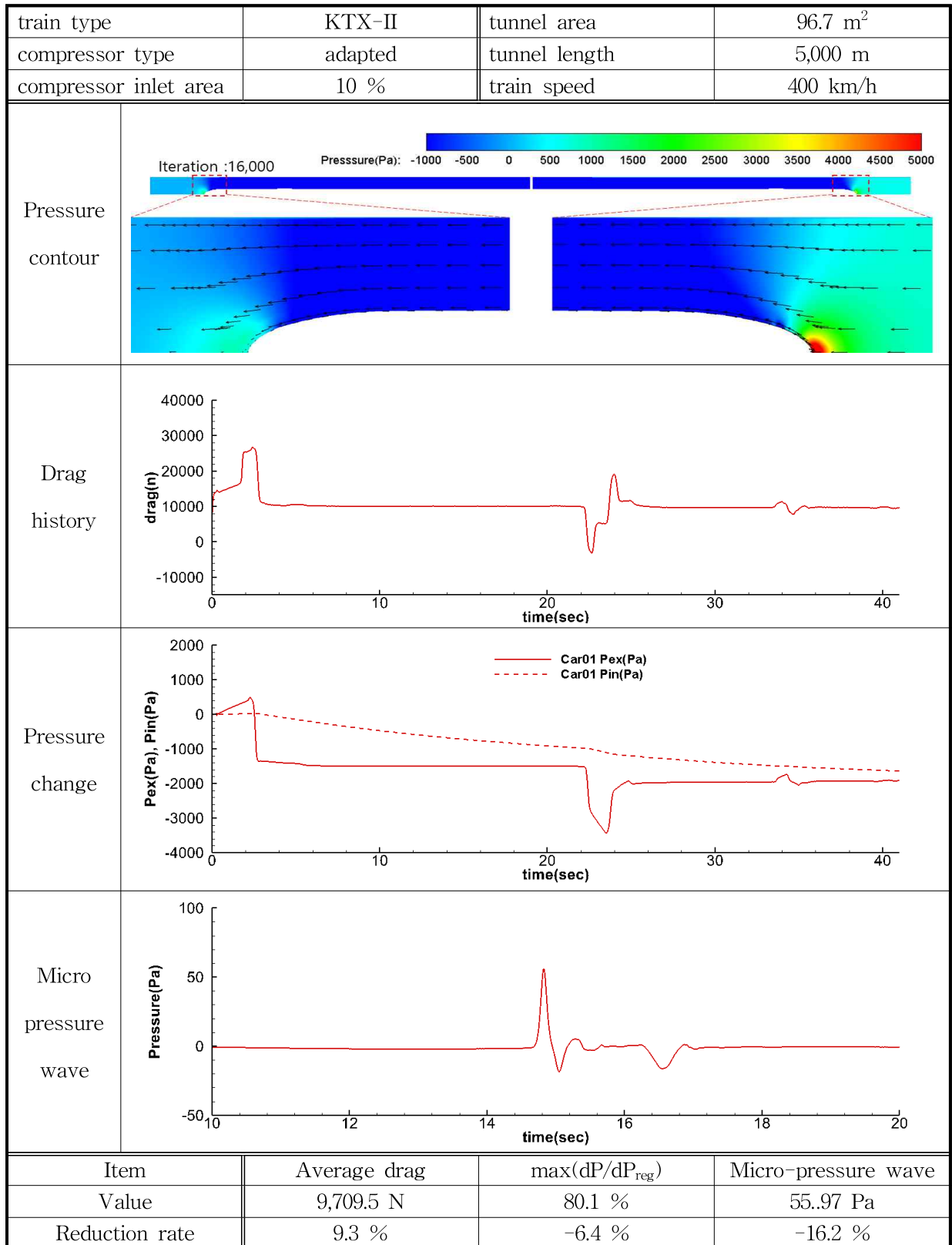
□ Case name : V213-T204-S400



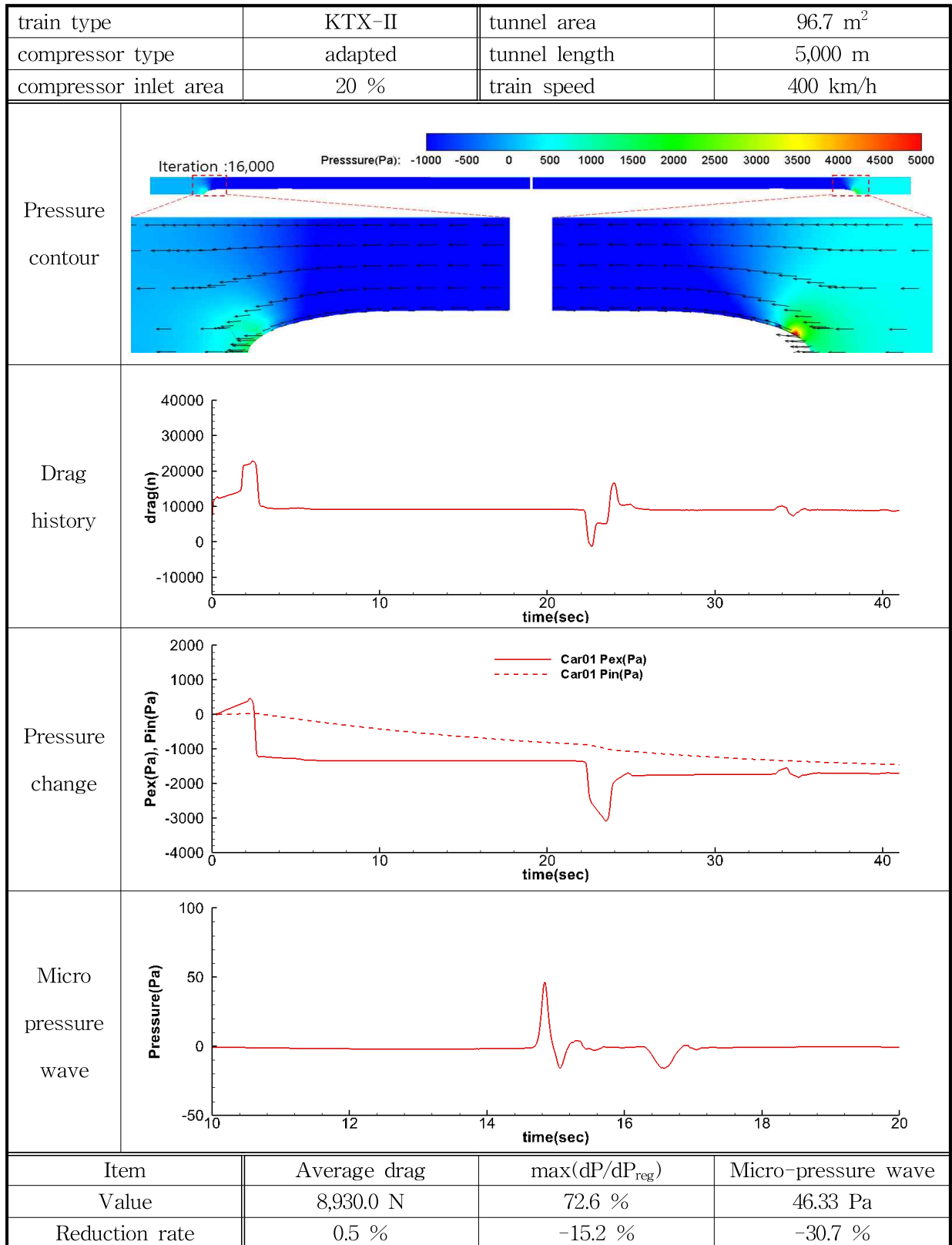
□ Case name : V201-T205-S400



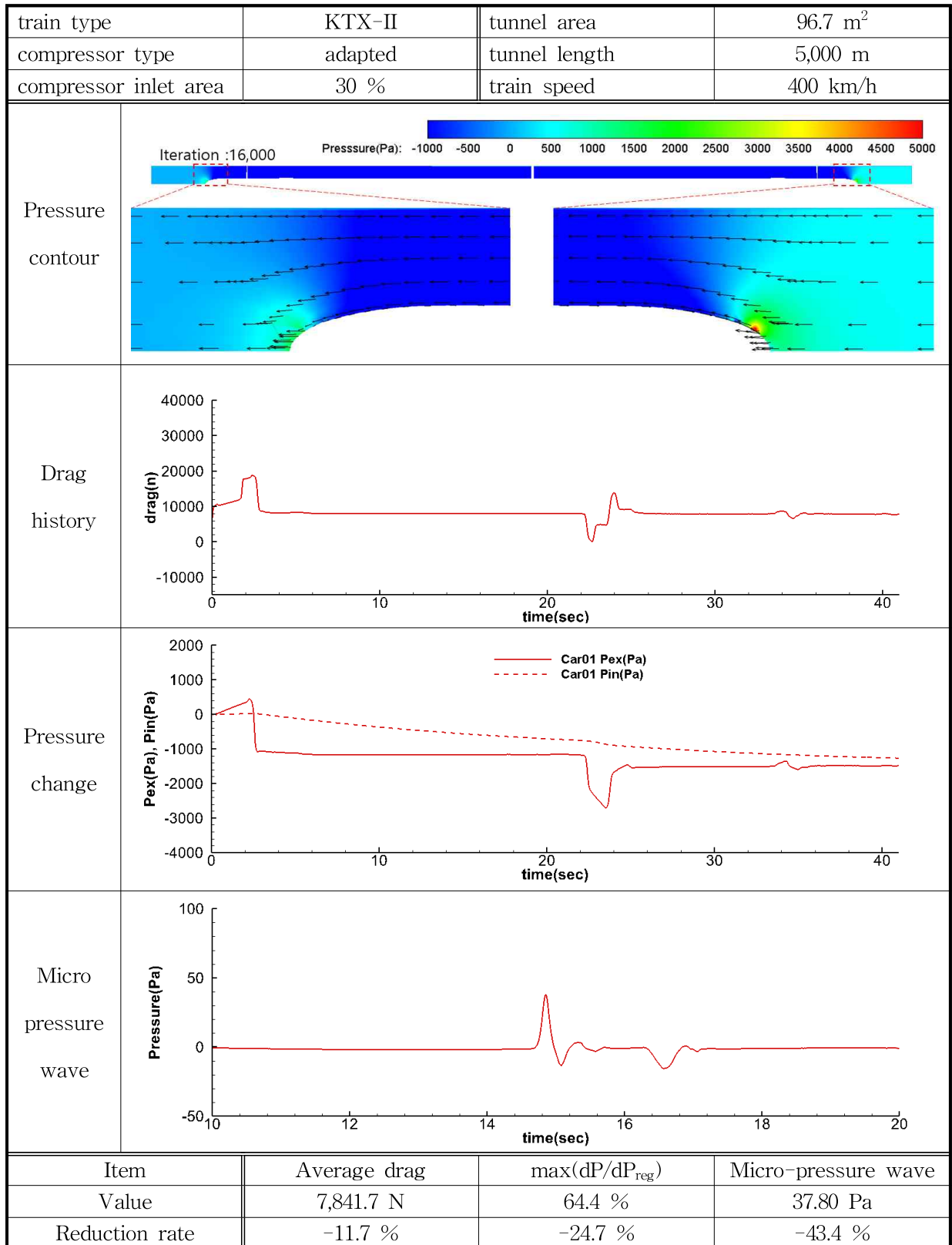
□ Case name : V211-T205-S400



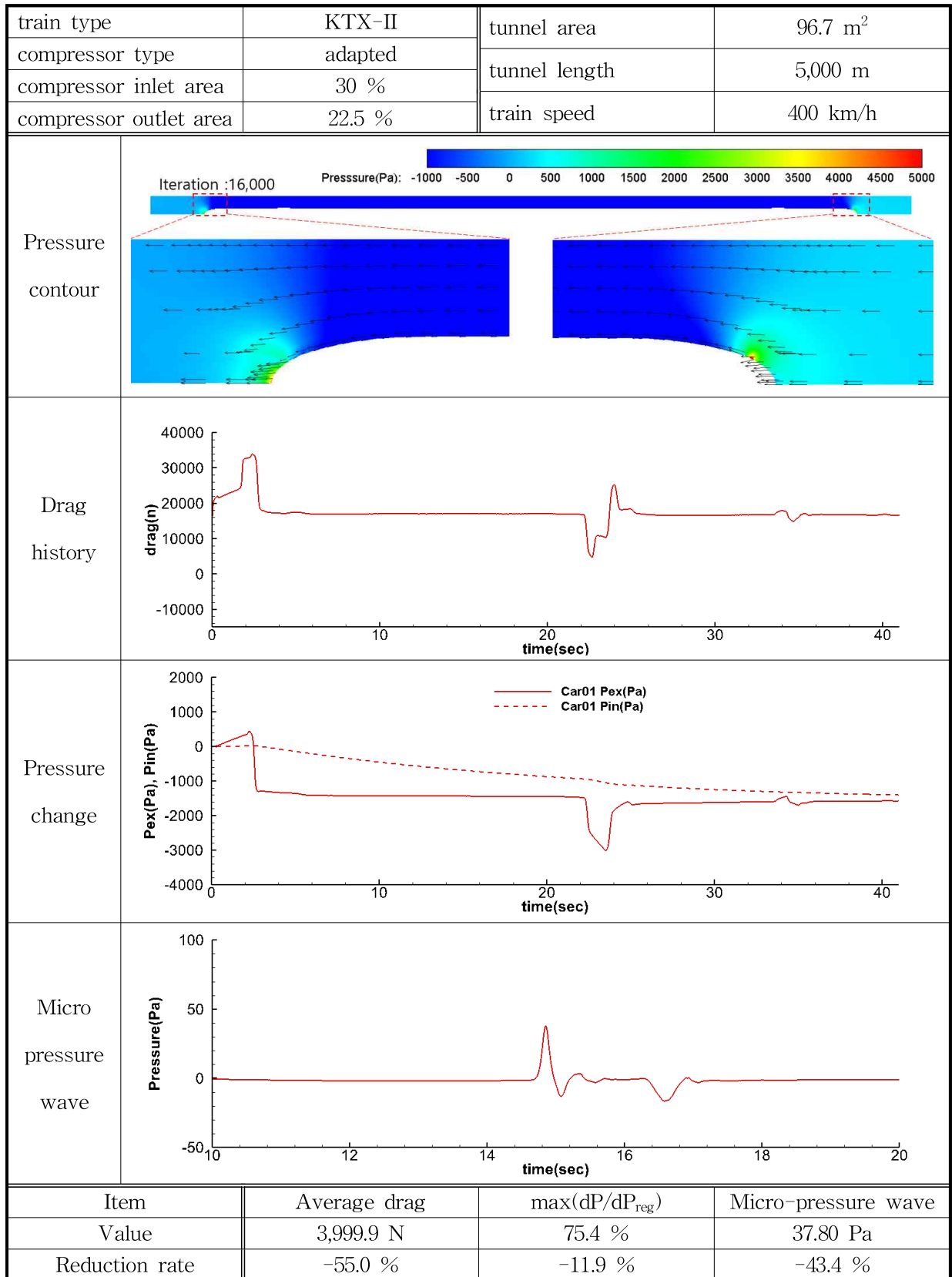
□ Case name : V212-T205-S400



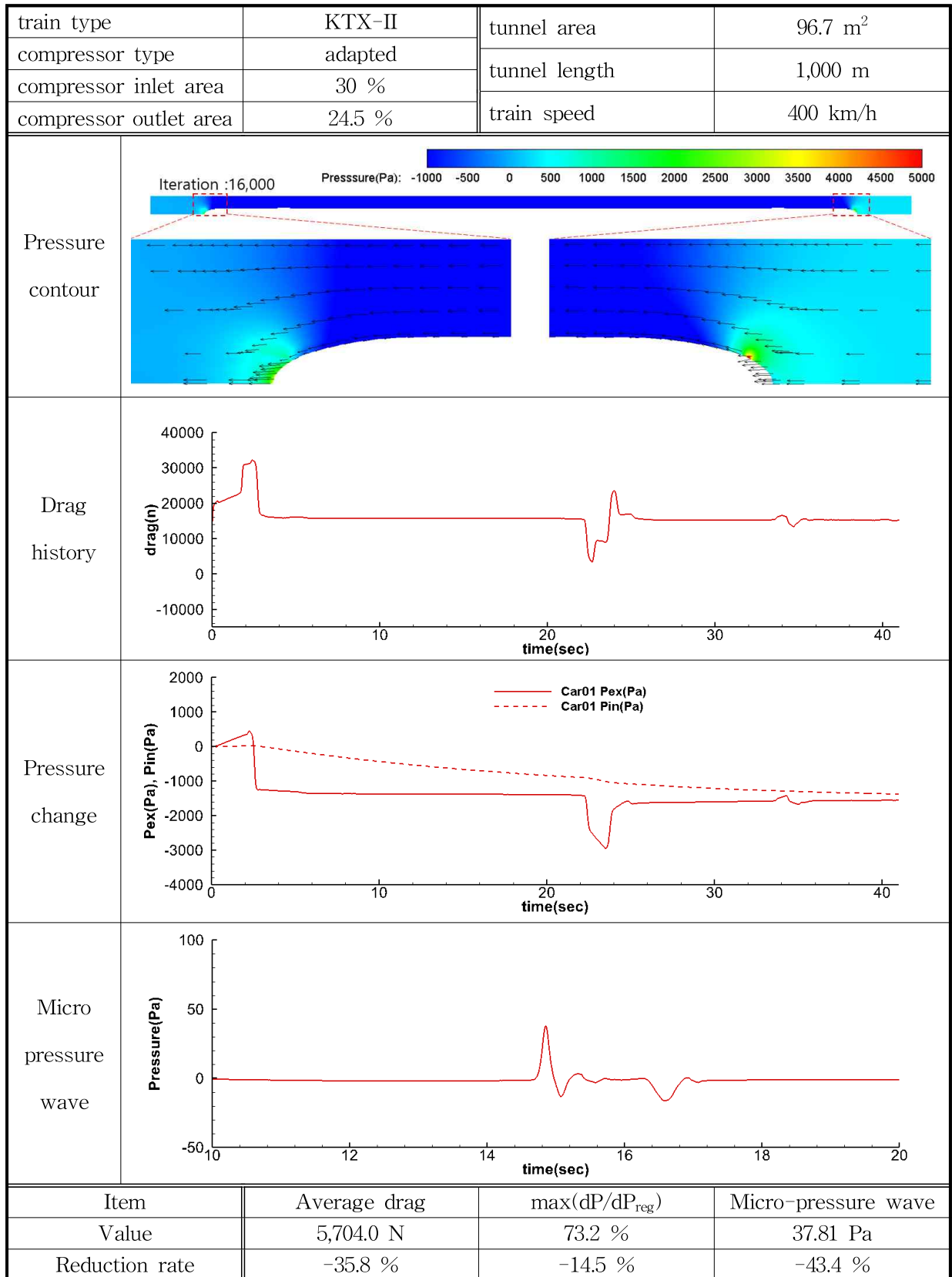
□ Case name : V213-T205-S400



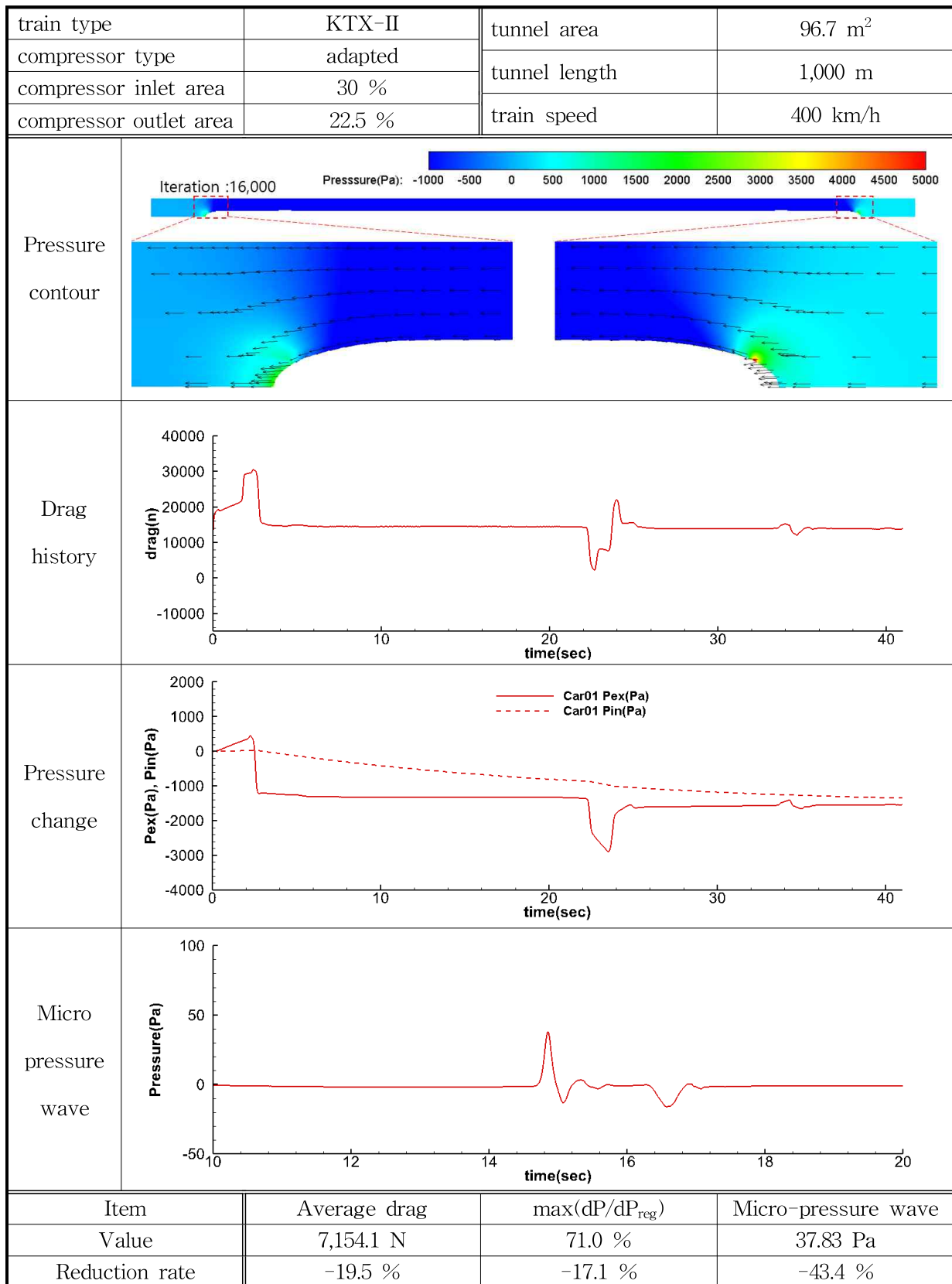
□ Case name : V213-1-T205-S400



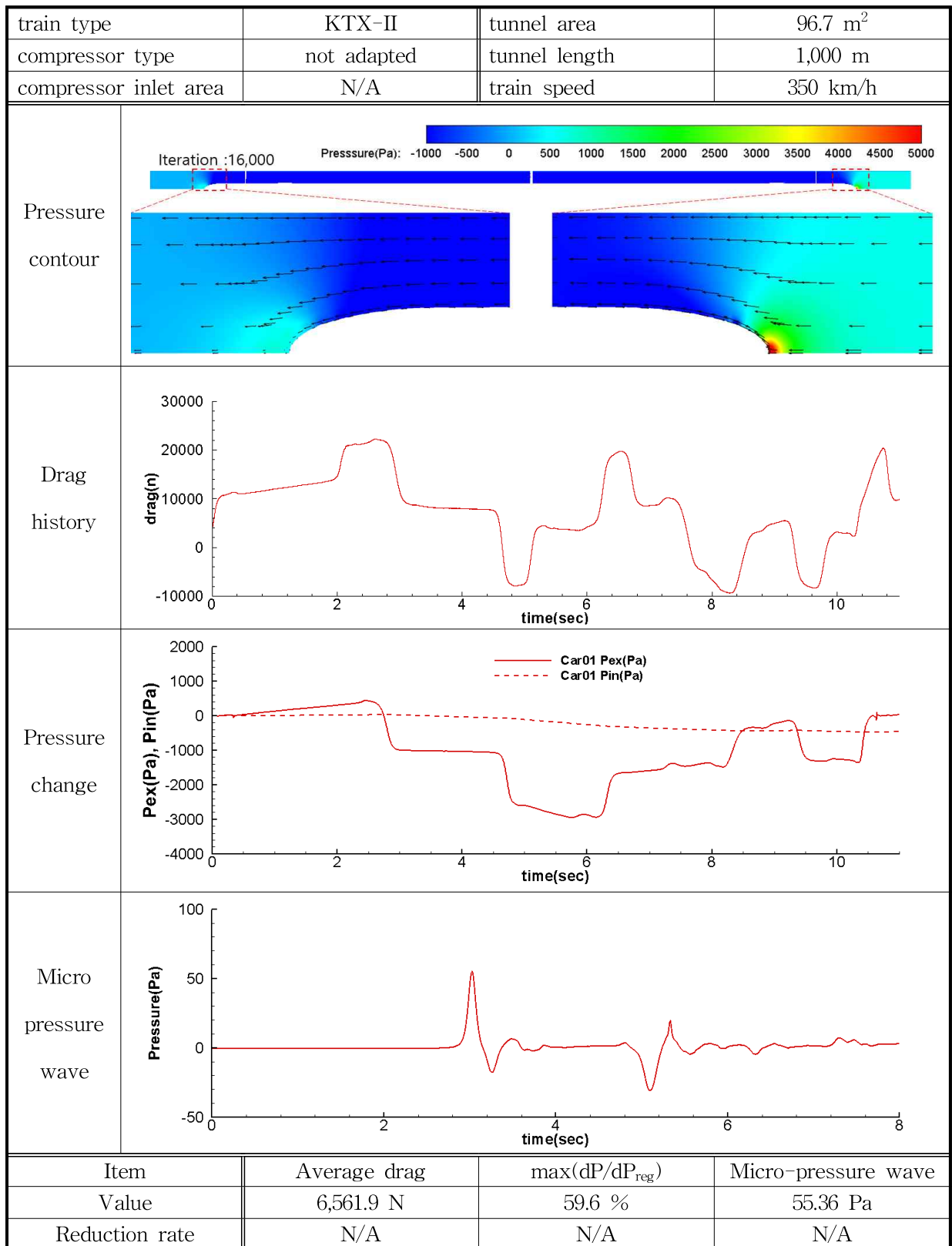
□ Case name : V213-2-T205-S400



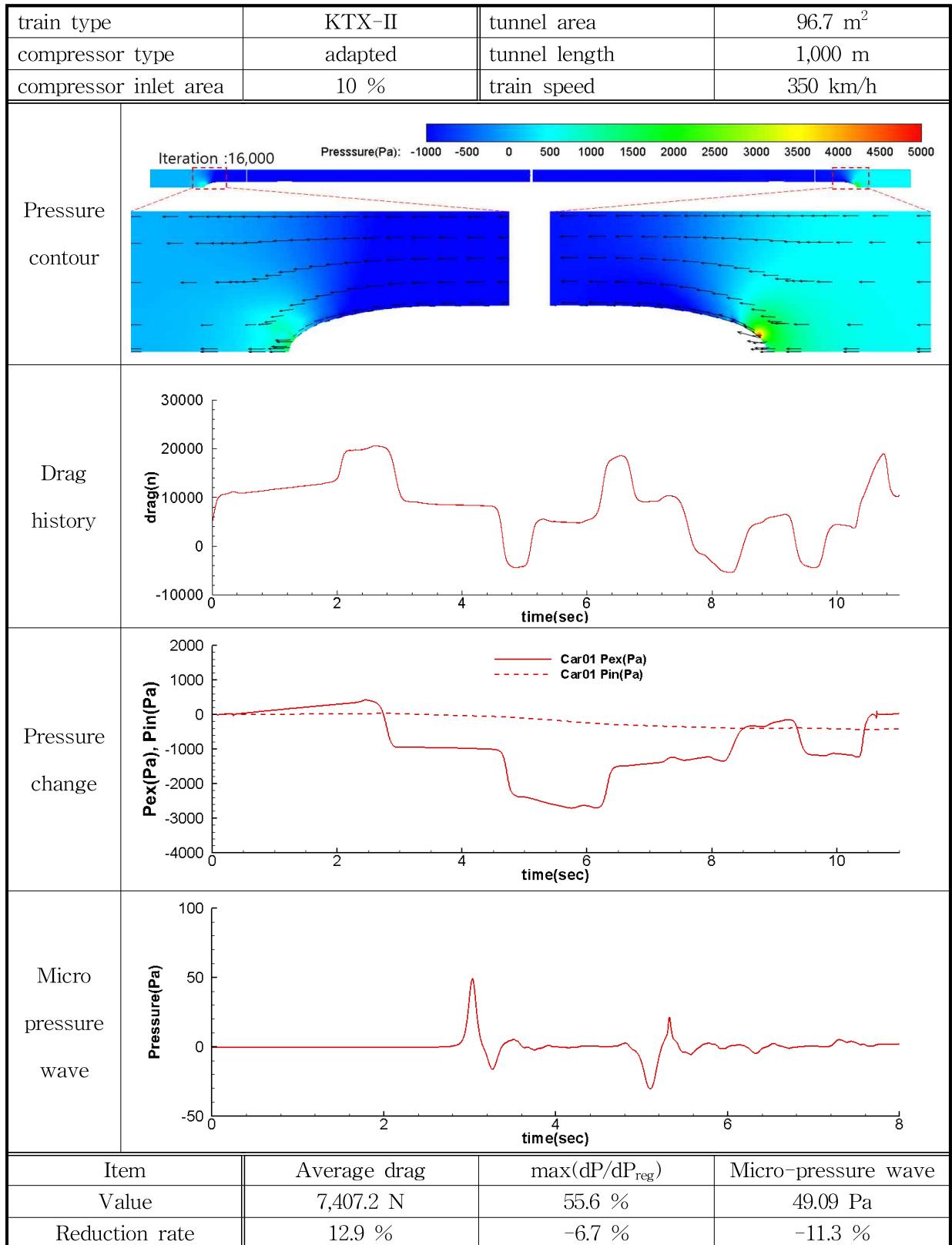
□ Case name : V213-3-T205-S400



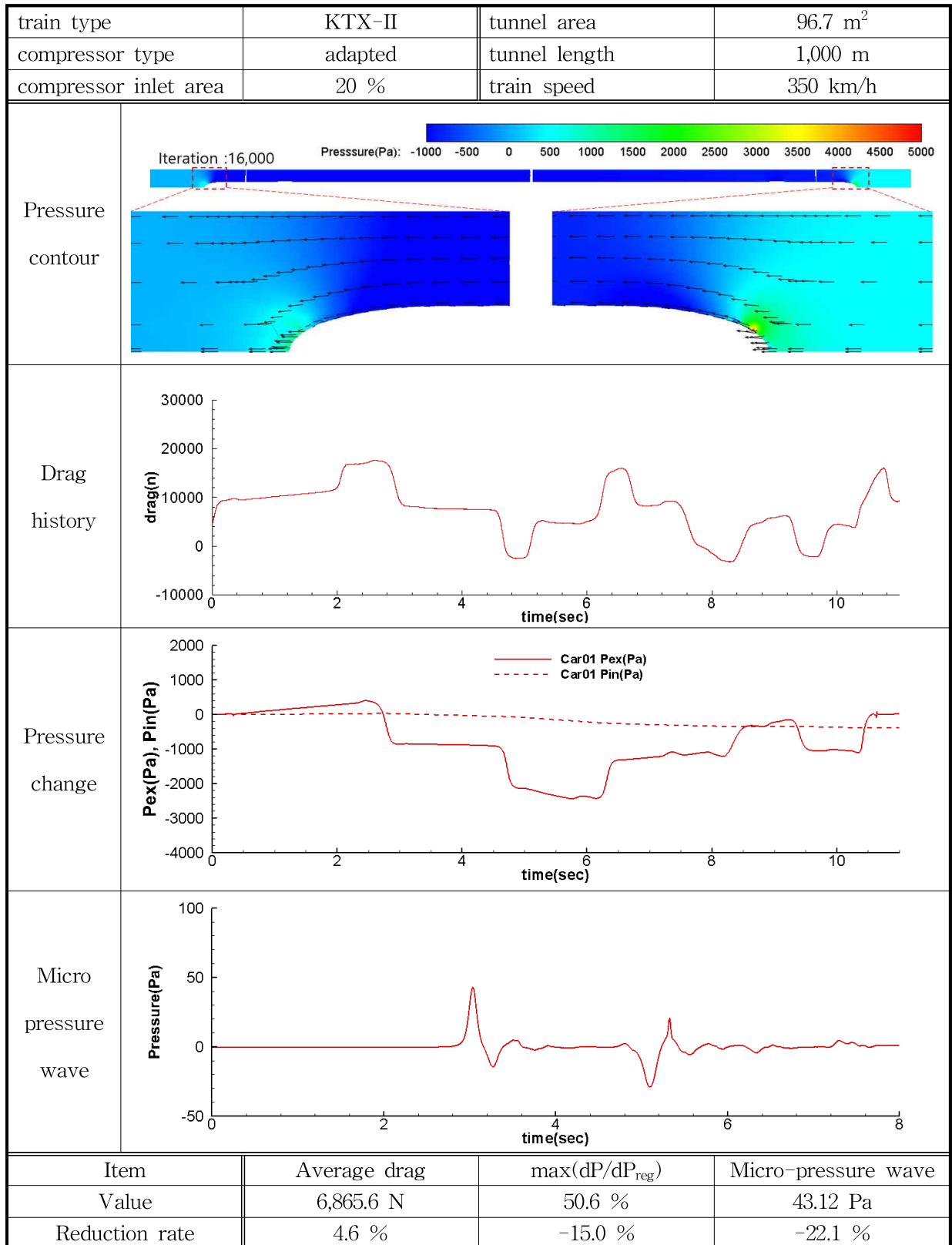
□ Case name : V201-T201-S350



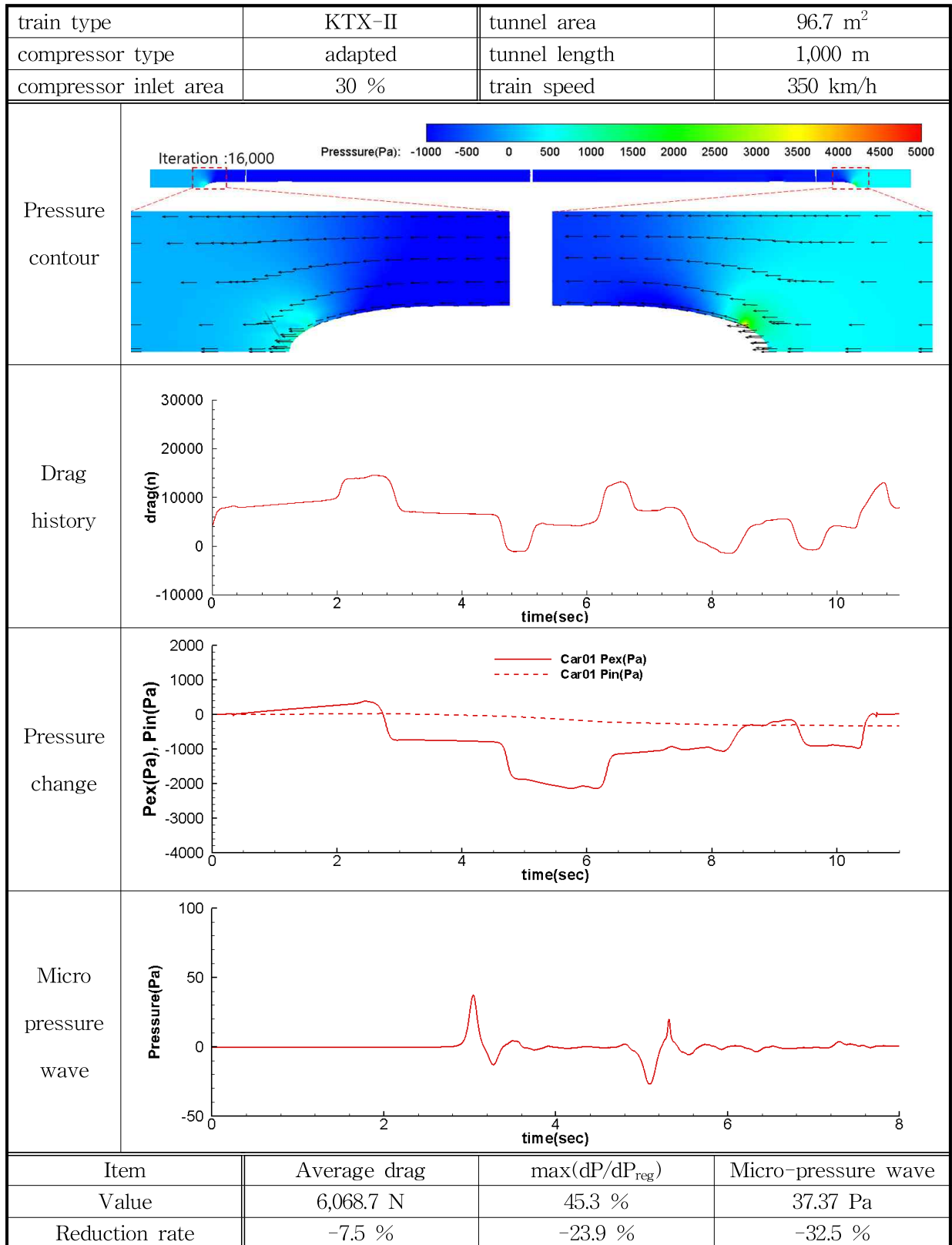
□ Case name : V211-T201-S350



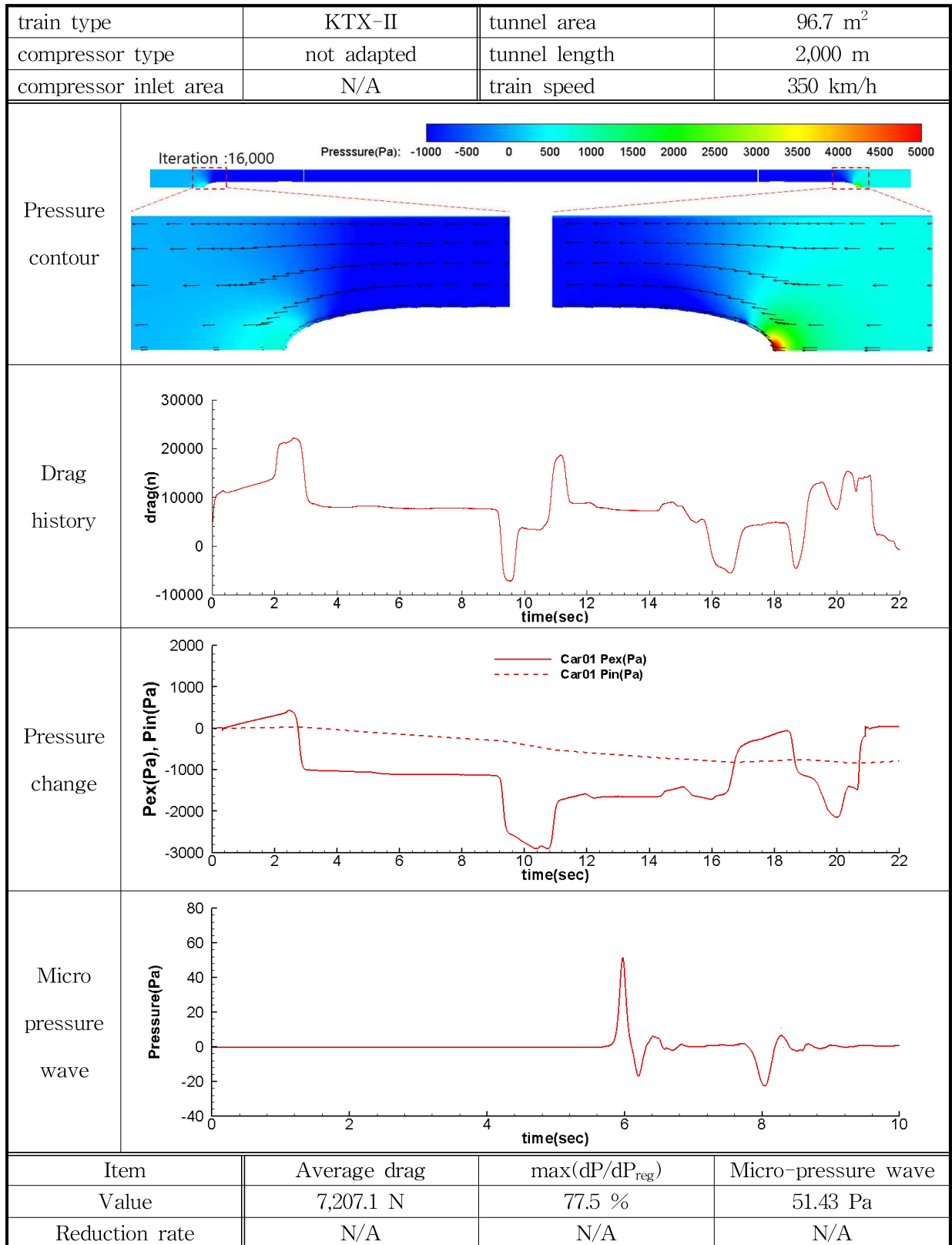
□ Case name : V212-T201-S350



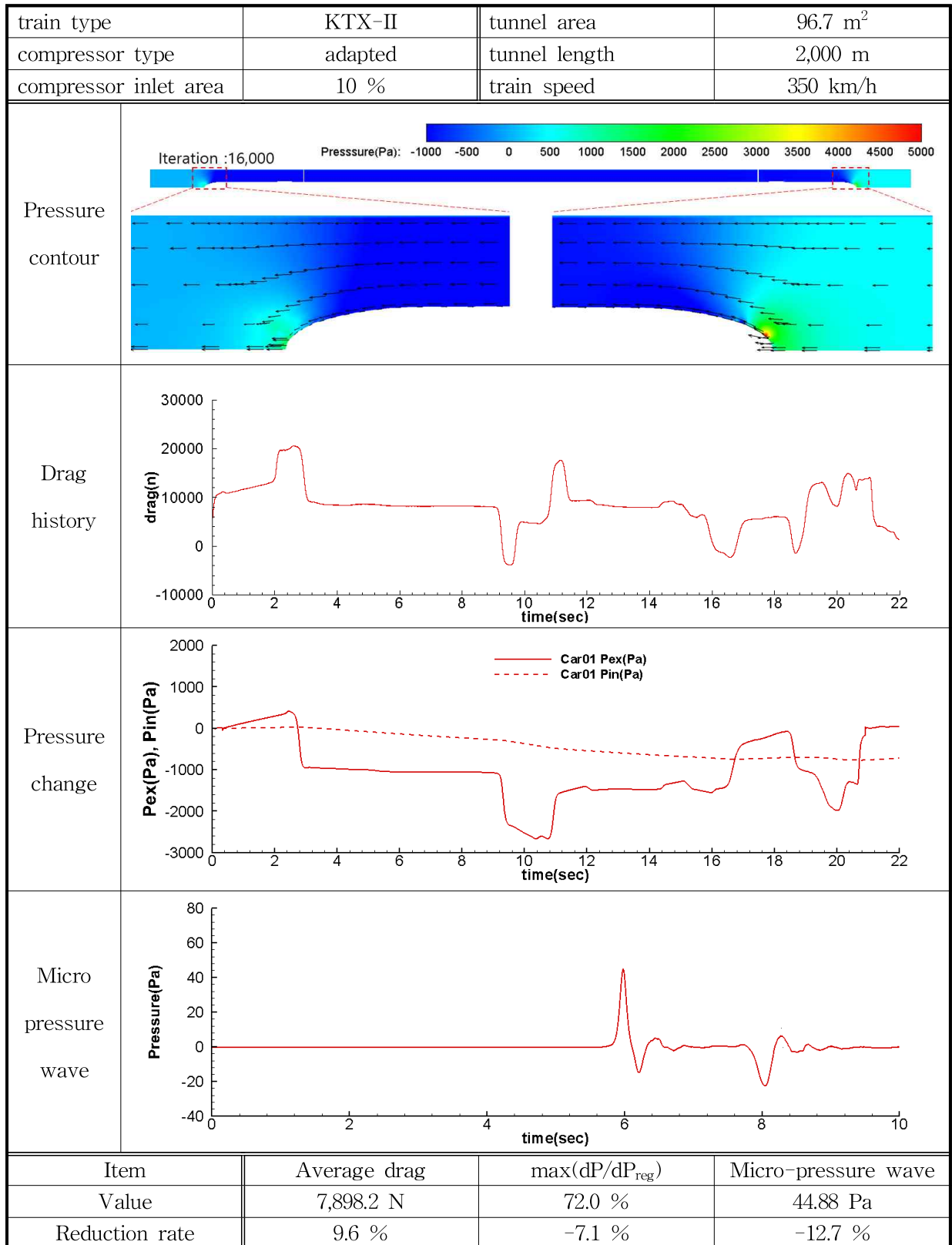
□ Case name : V213-T201-S350



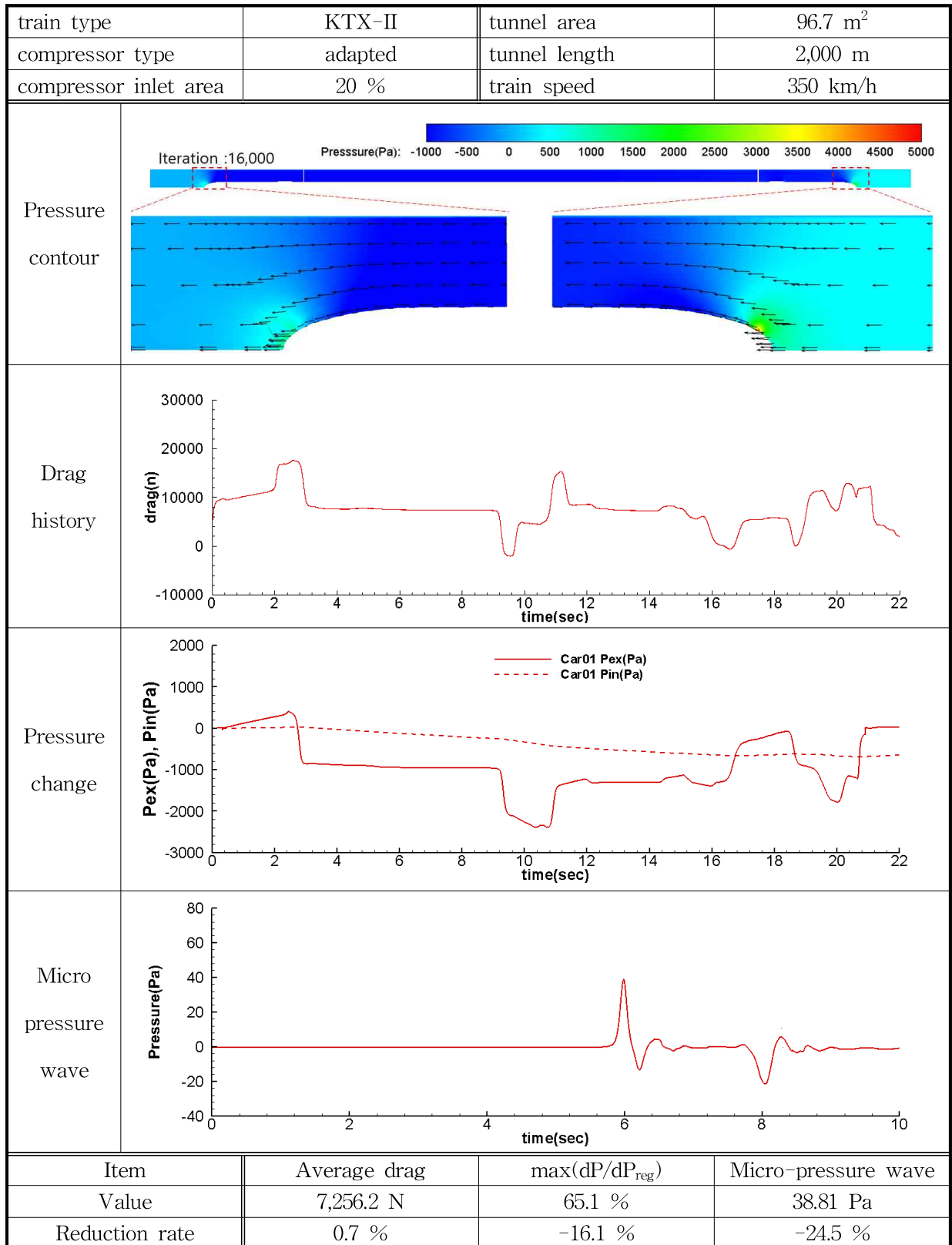
□ Case name : V201-T202-S350



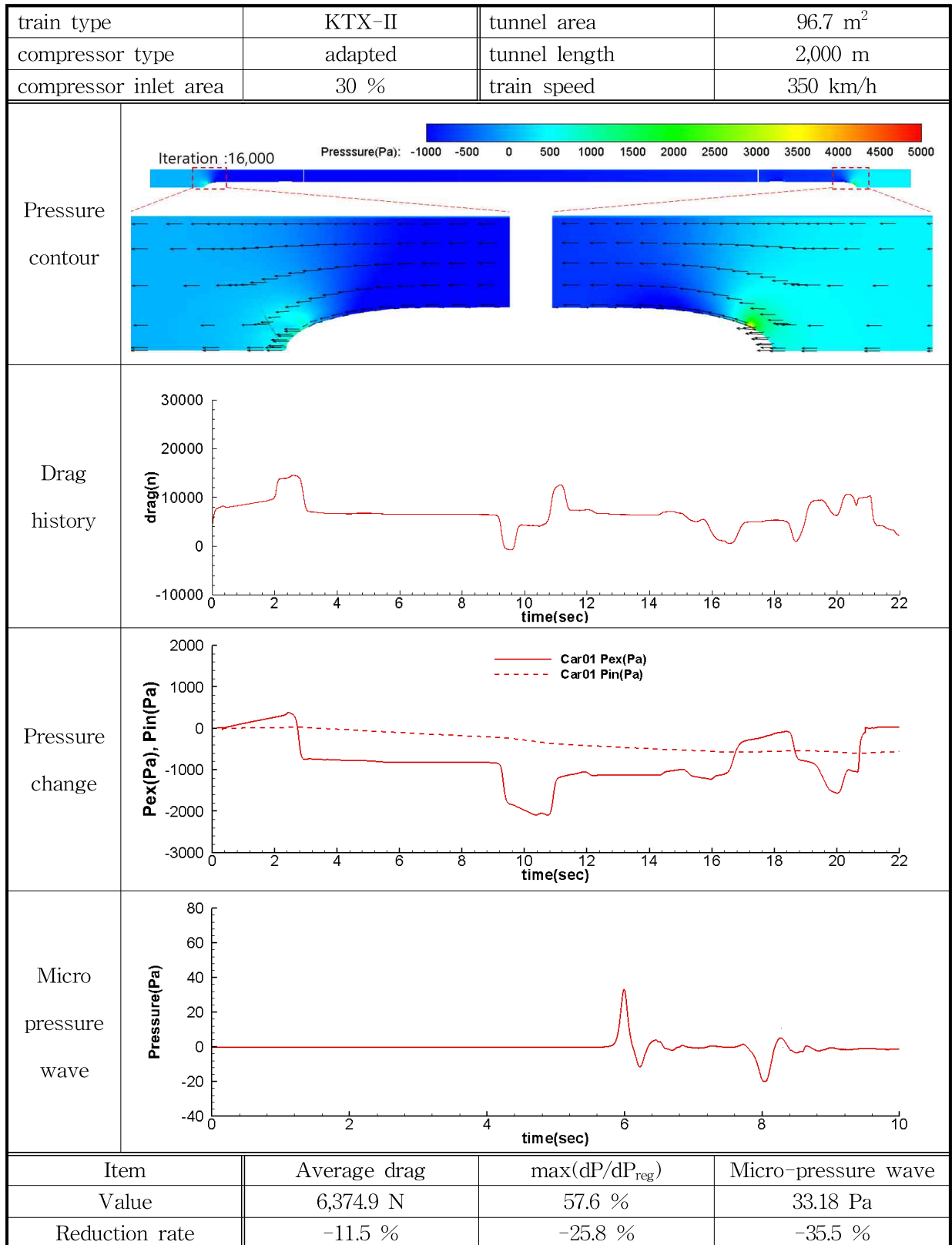
□ Case name : V211-T202-S350



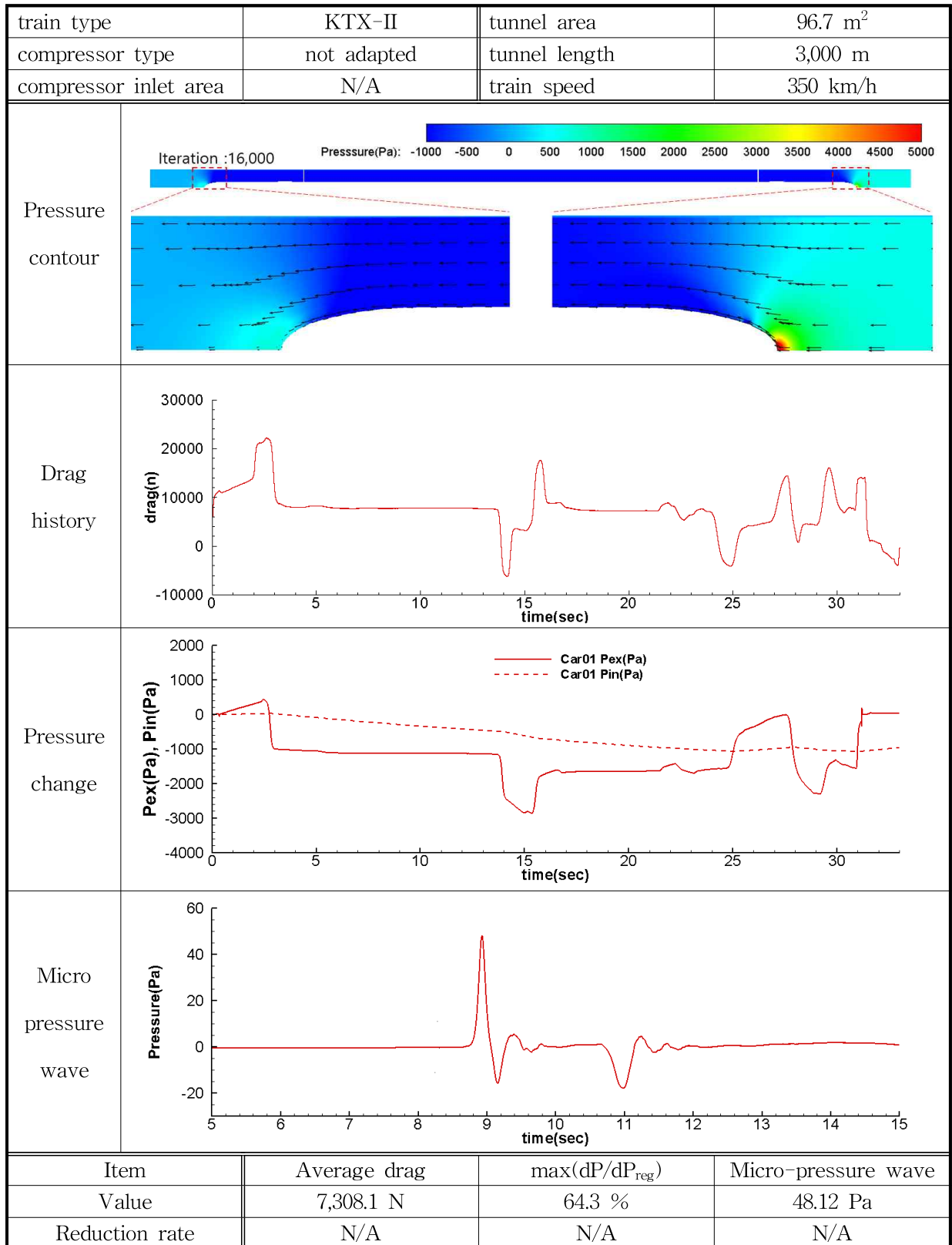
□ Case name : V212-T202-S350



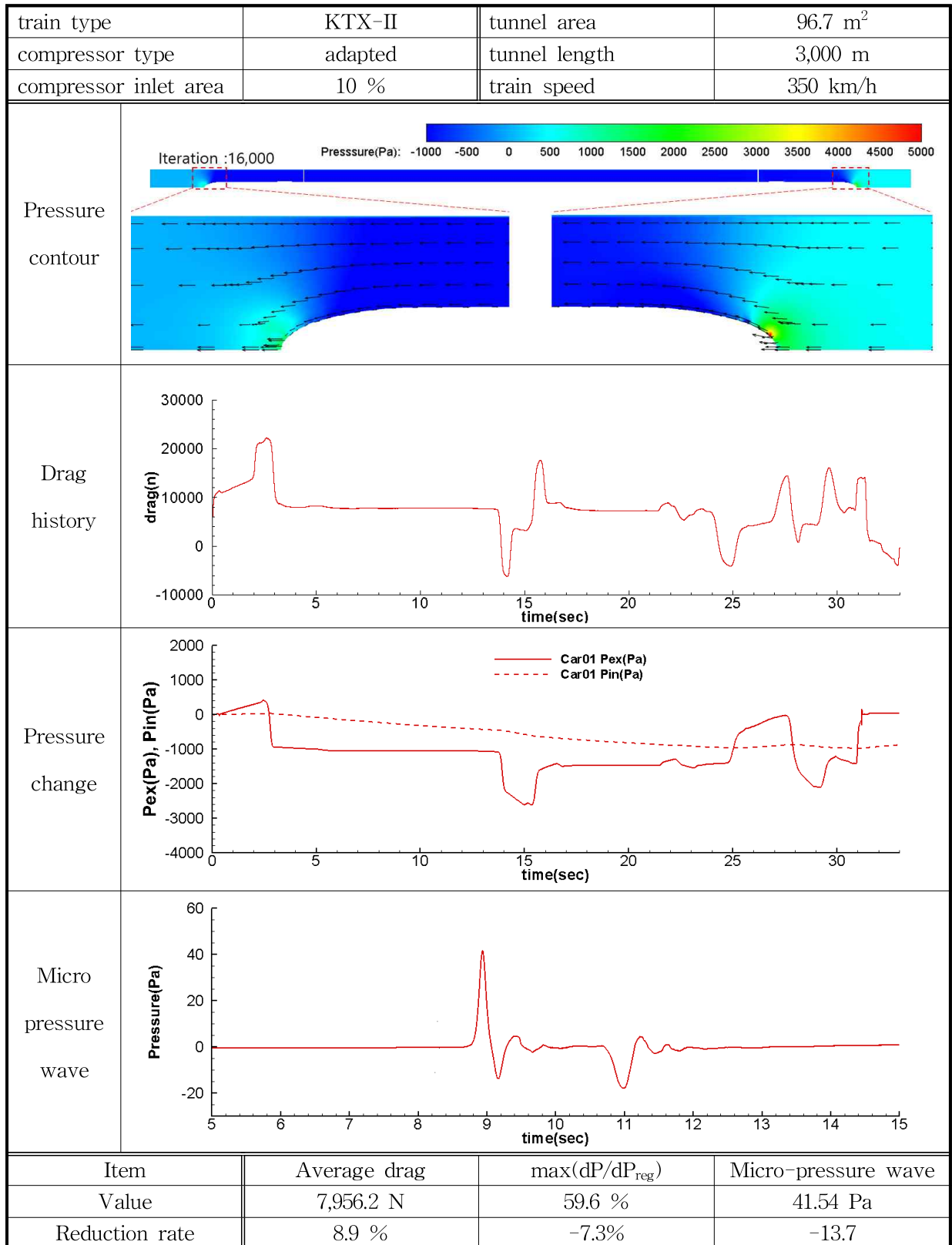
□ Case name : V213-T202-S350



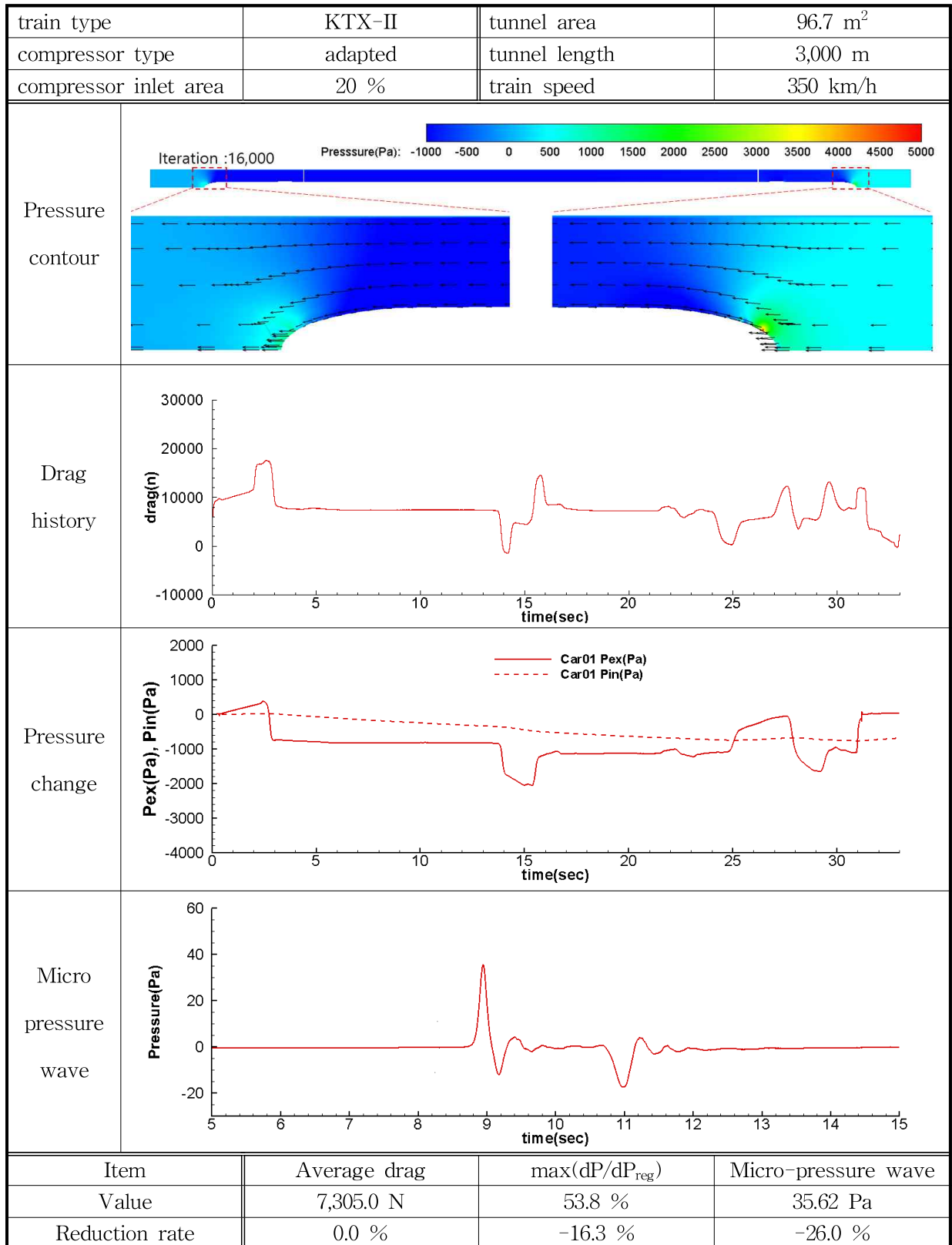
□ Case name : V201-T203-S350



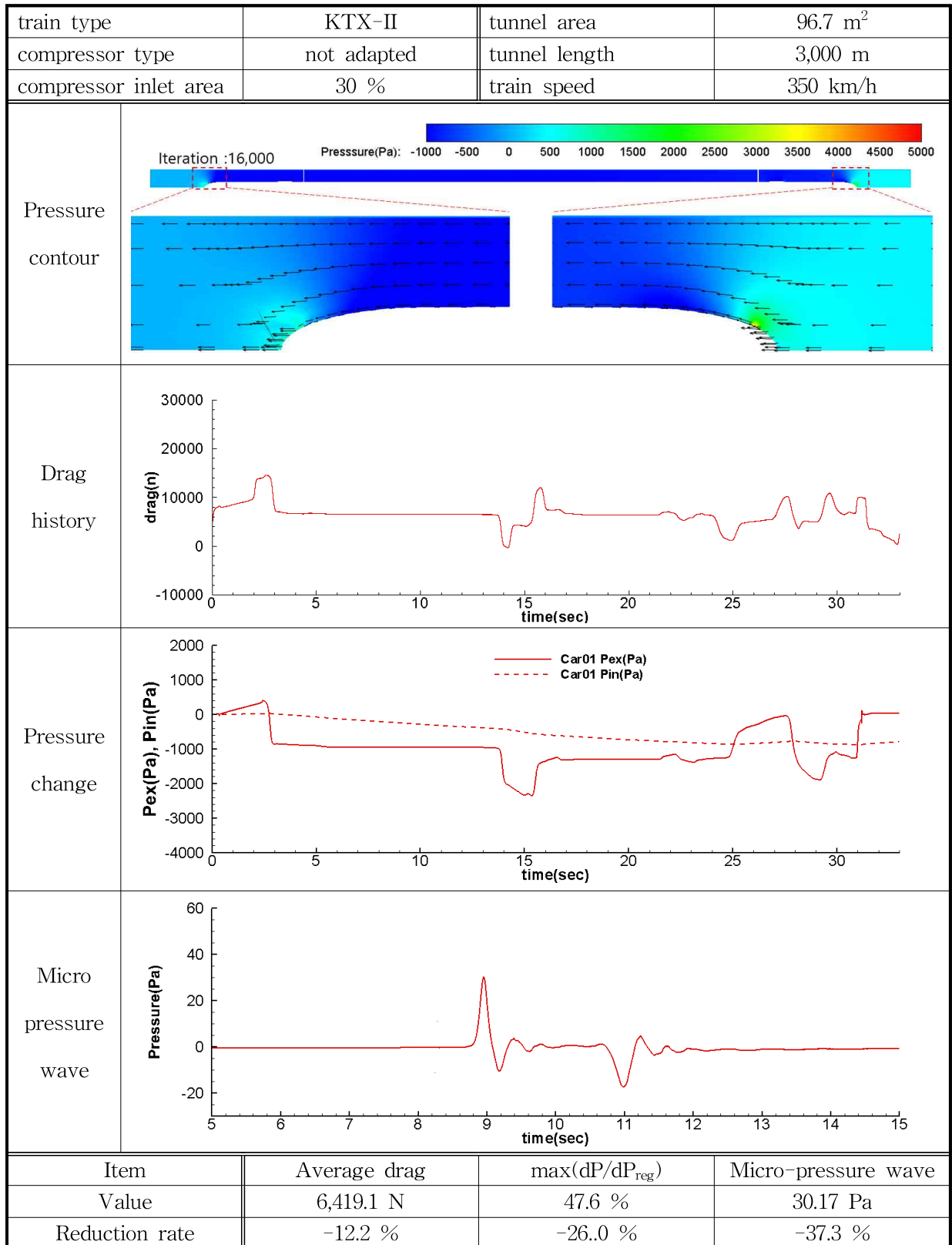
□ Case name : V211-T203-S350



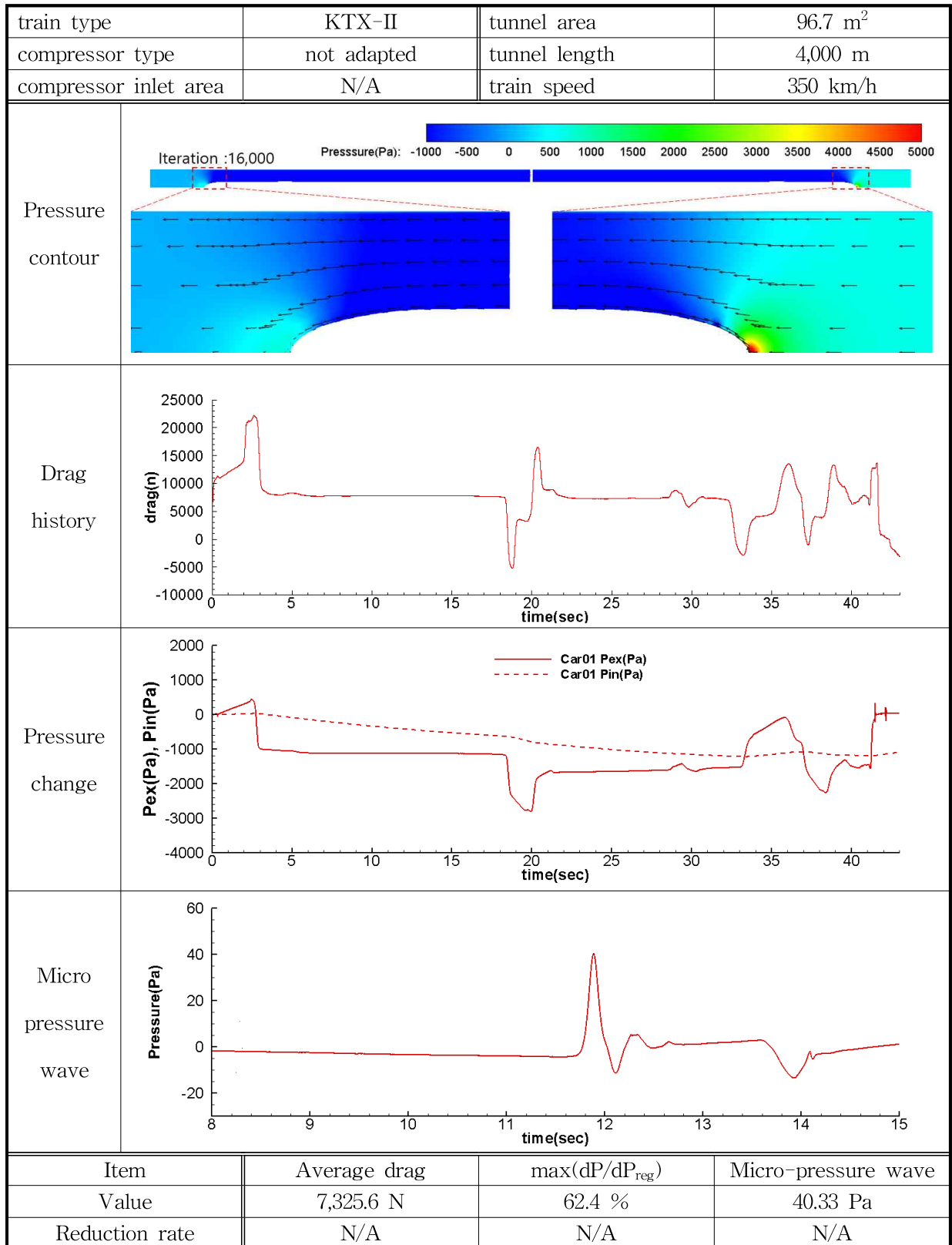
□ Case name : V212-T203-S350



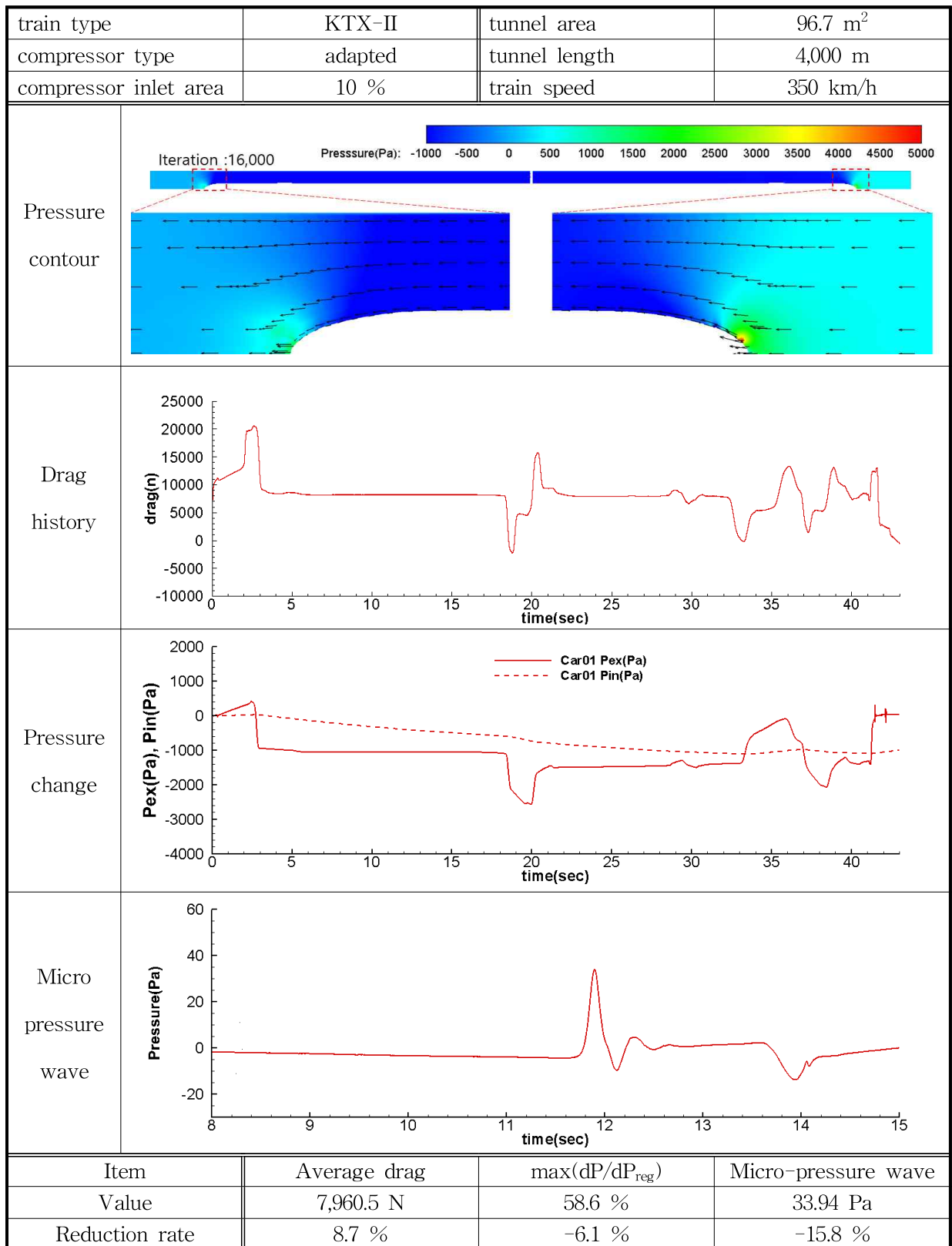
□ Case name : V213-T203-S350



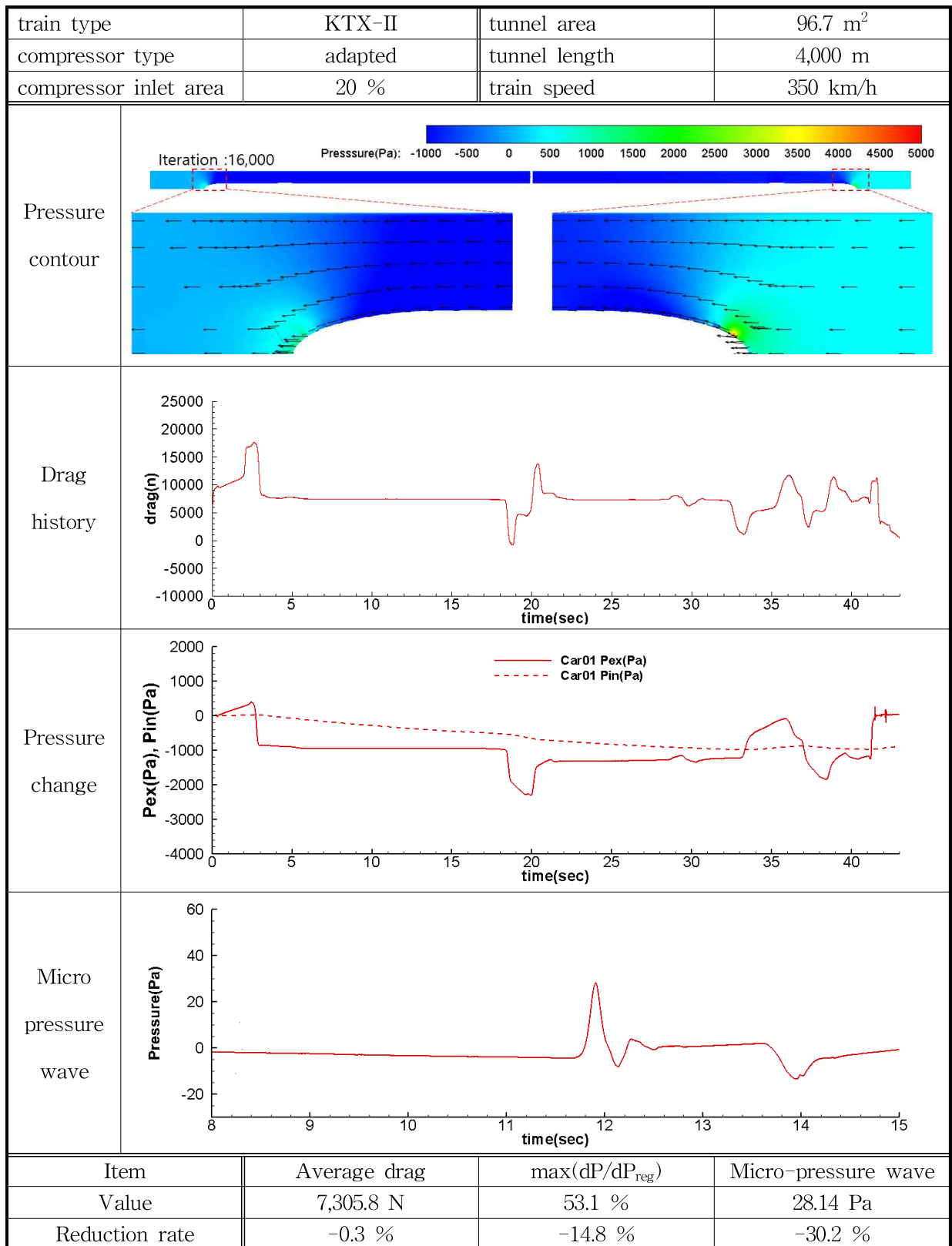
□ Case name : V201-T204-S350



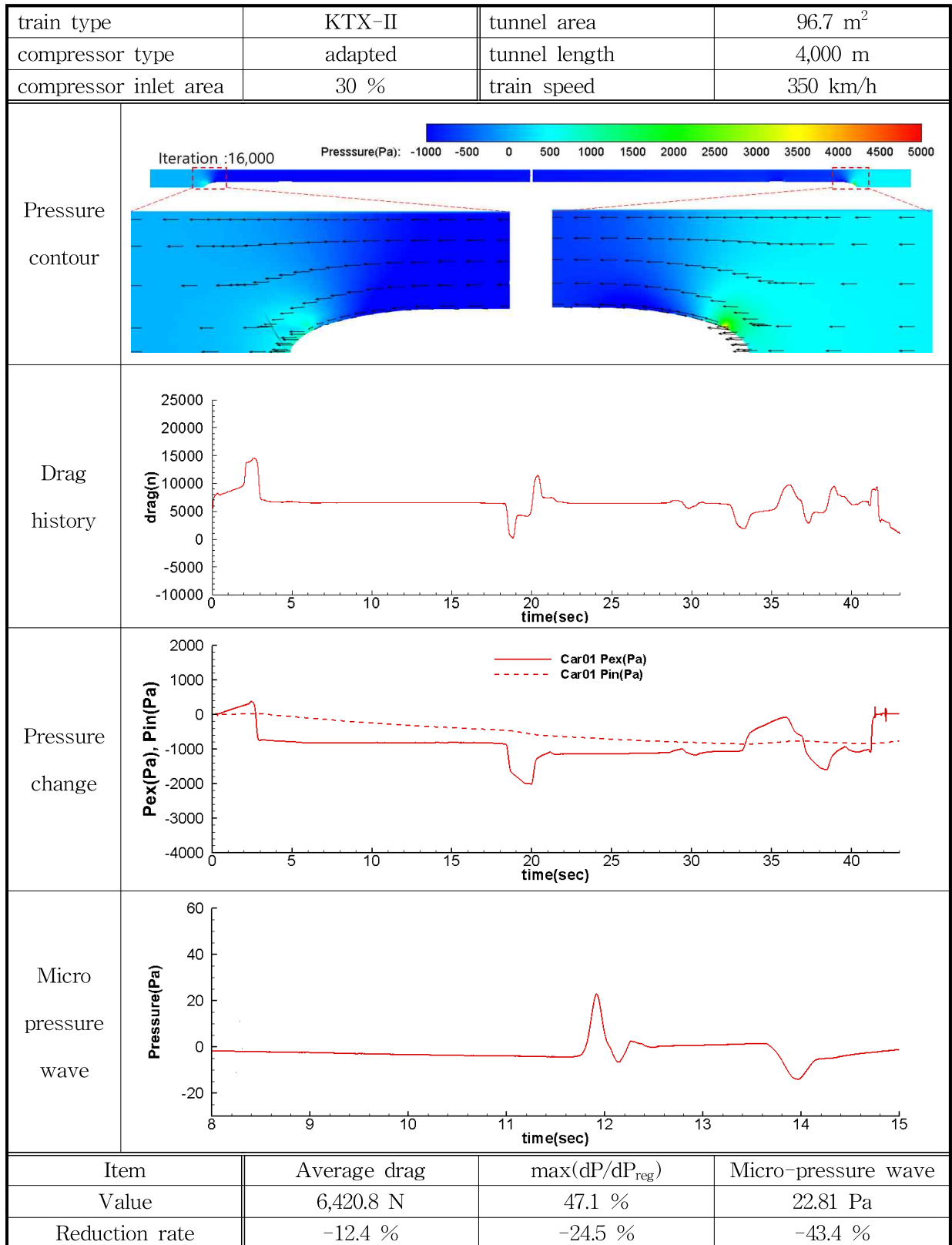
□ Case name : V211-T204-S350



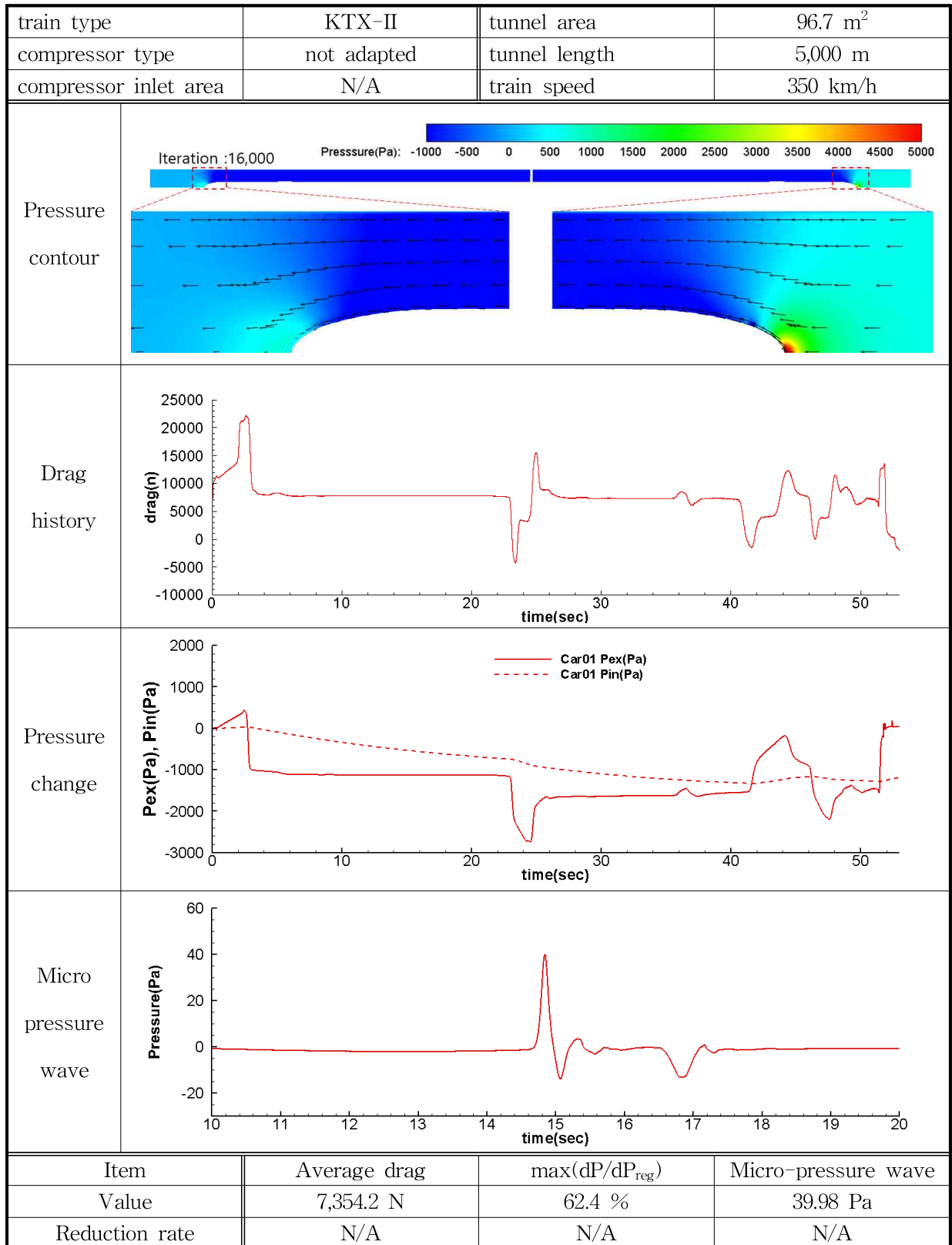
□ Case name : V212-T204-S350



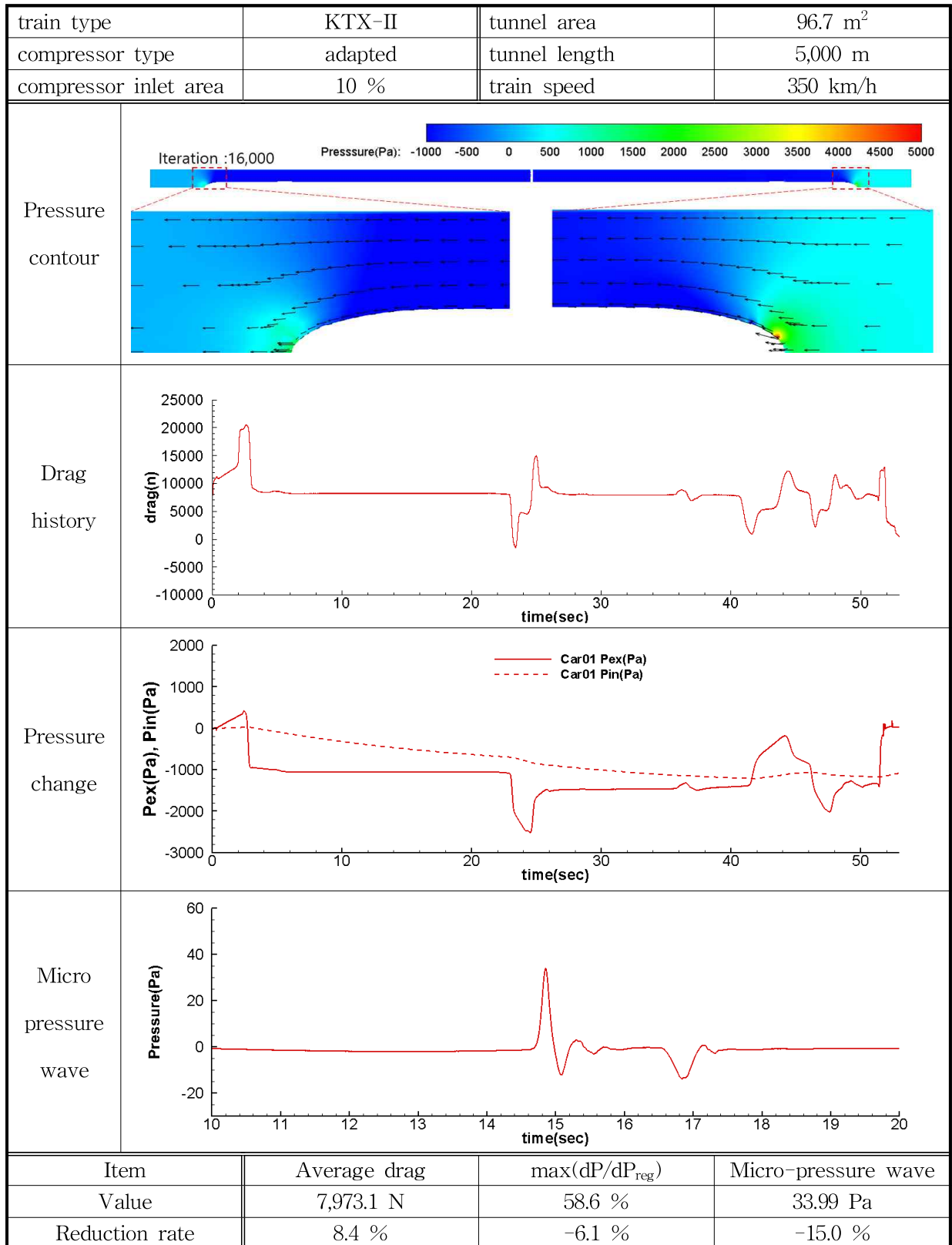
□ Case name : V213-T204-S350



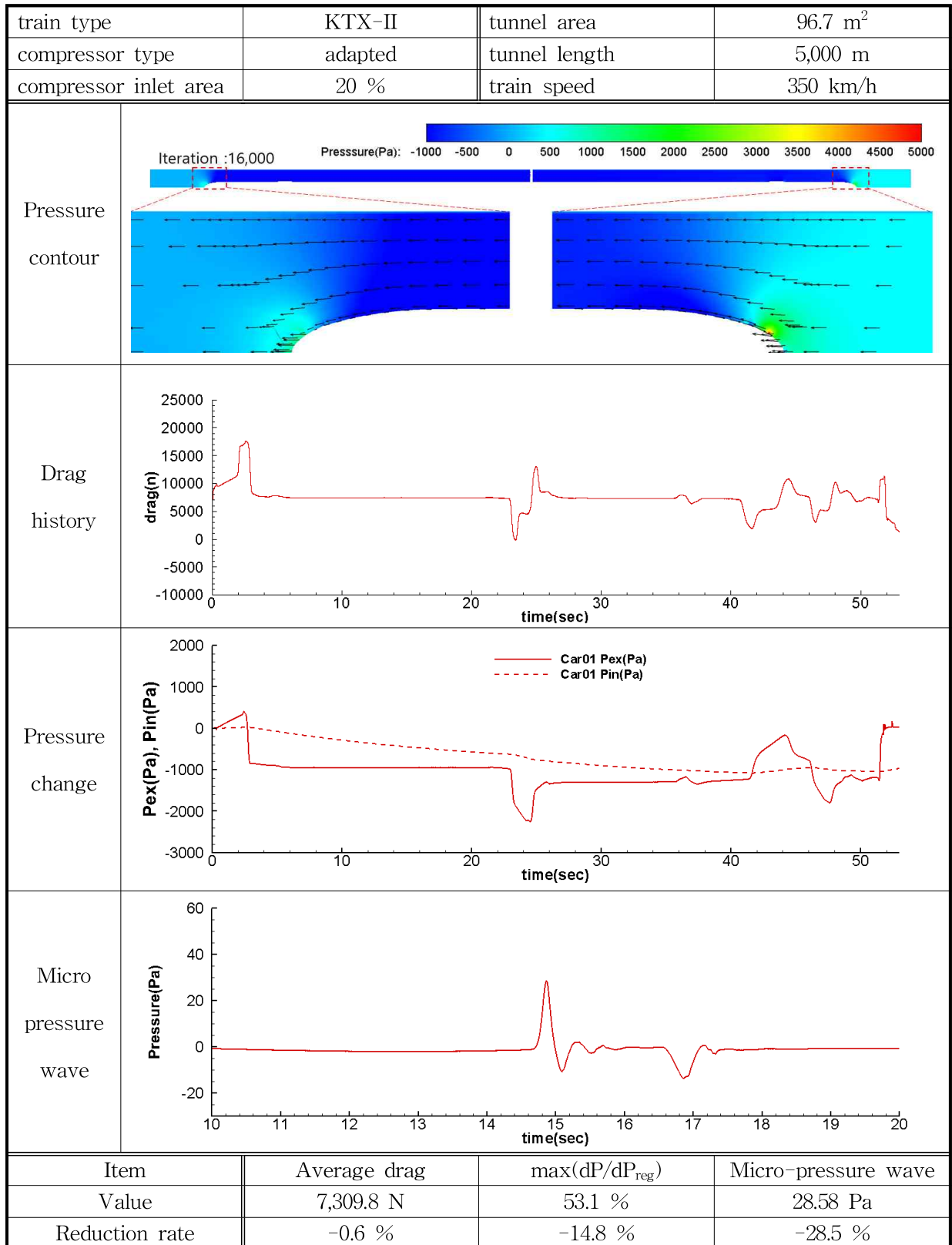
□ Case name : V201-T205-S350



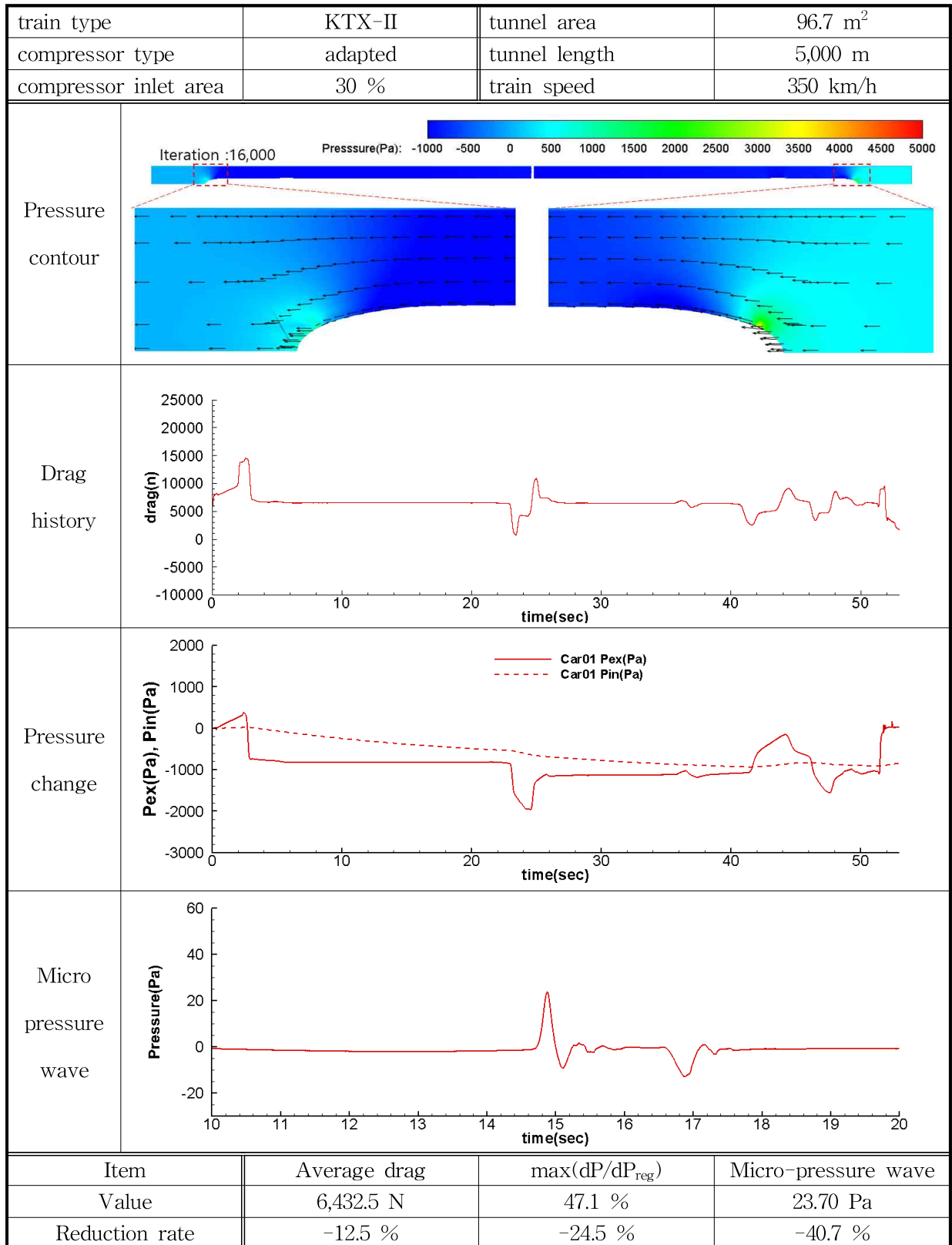
□ Case name : V211-T205-S350



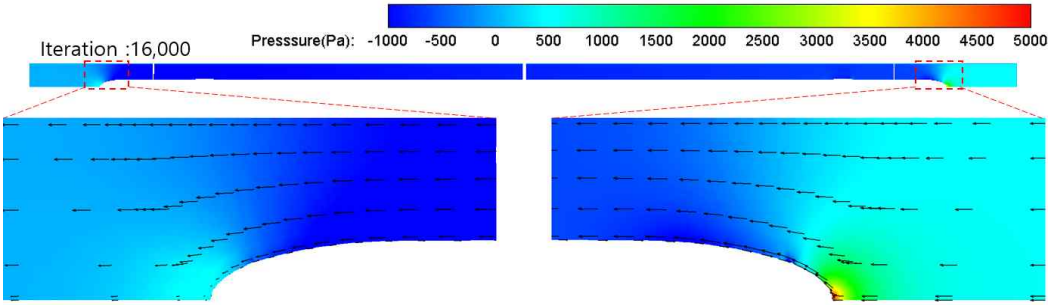
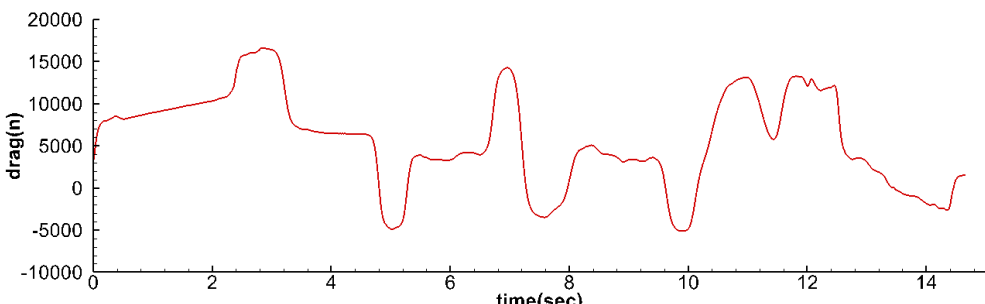
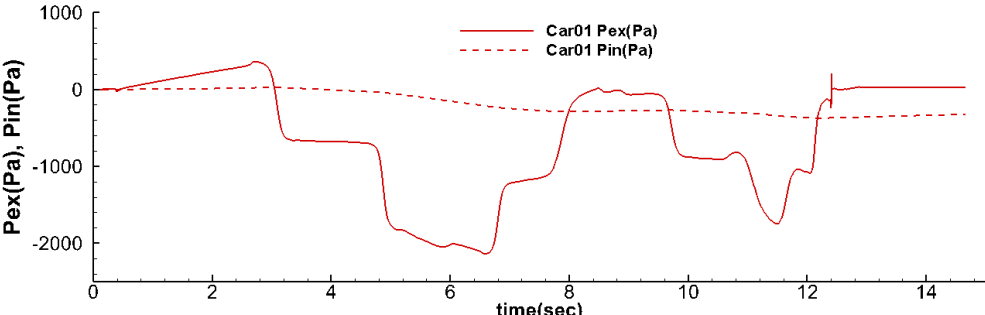
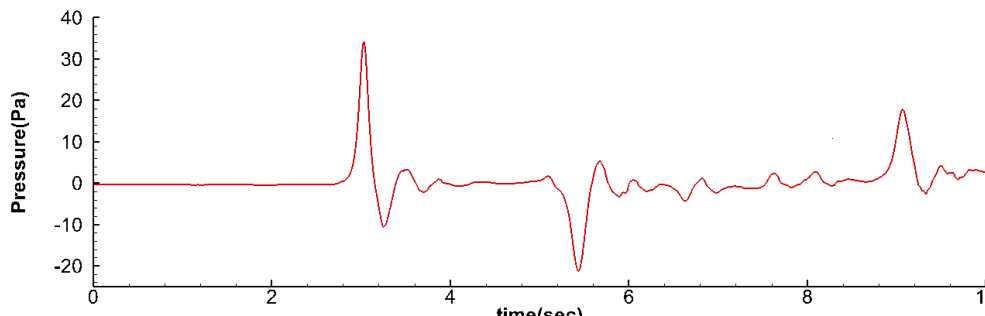
□ Case name : V212-T205-S350



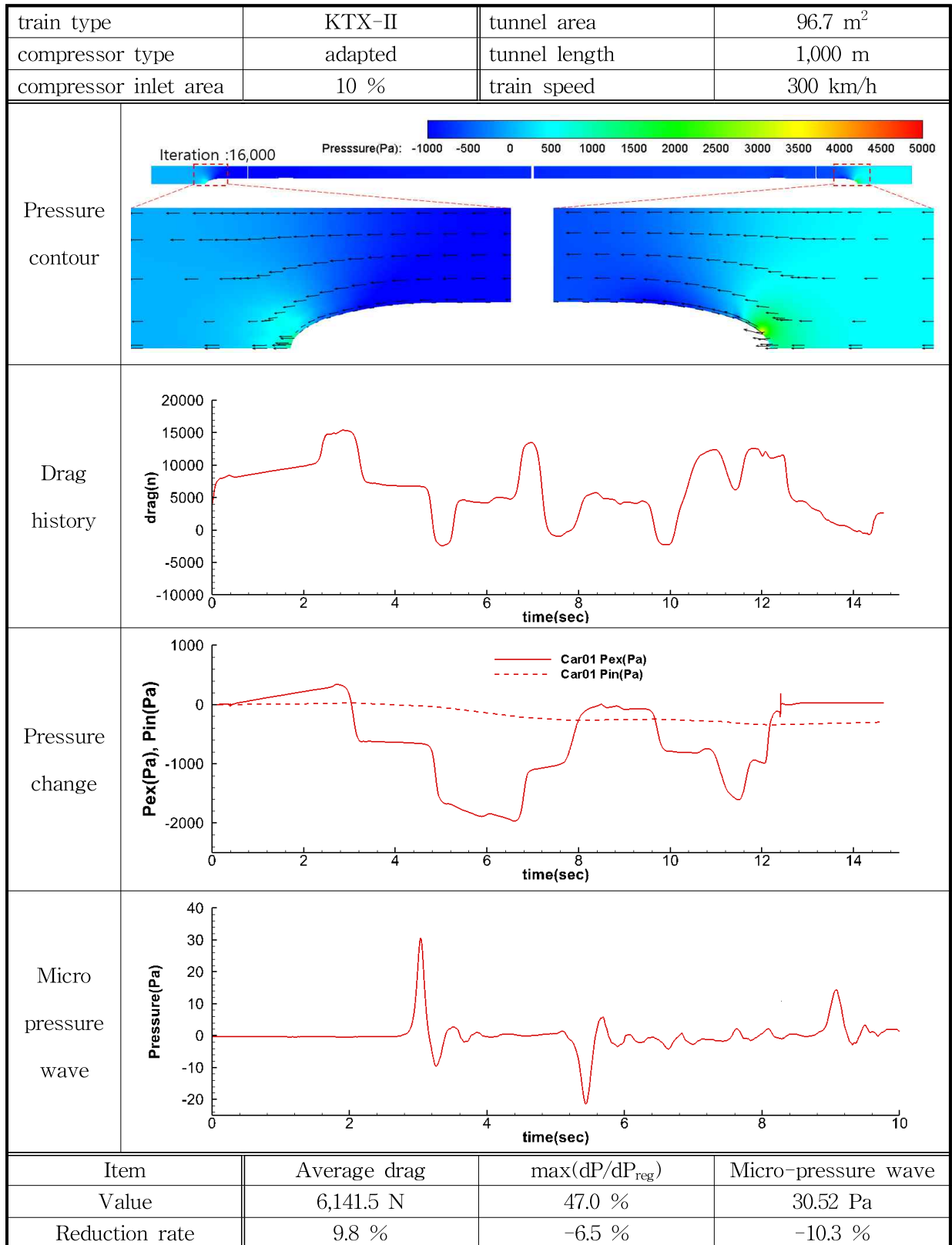
□ Case name : V213-T205-S350



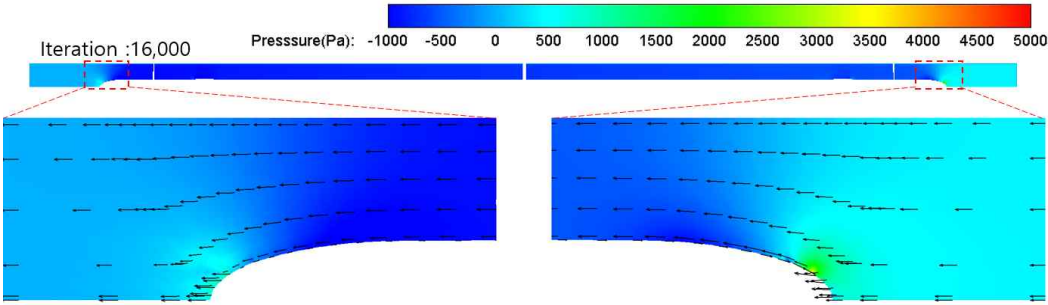
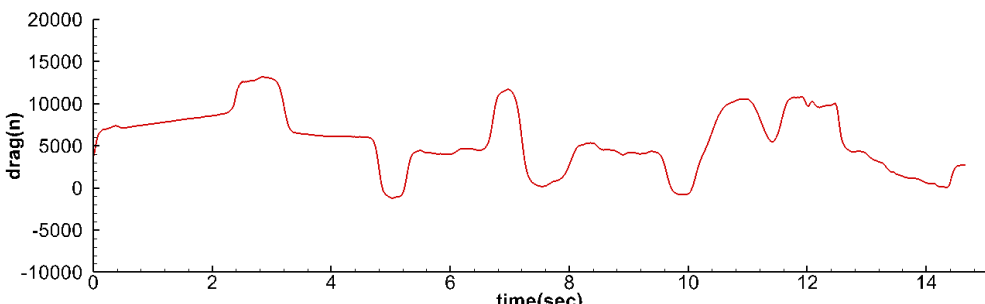
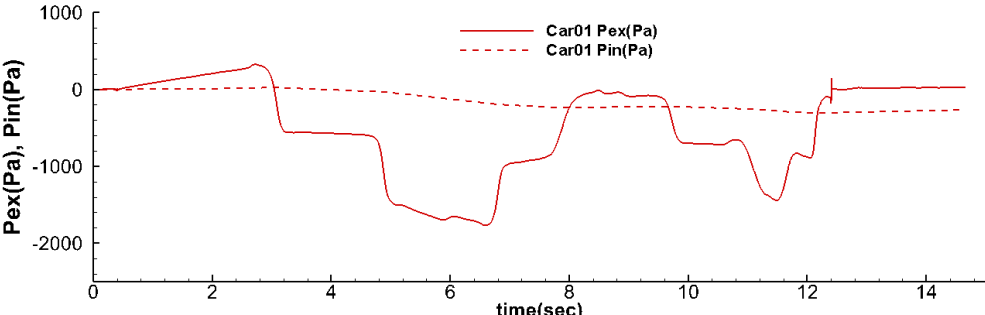
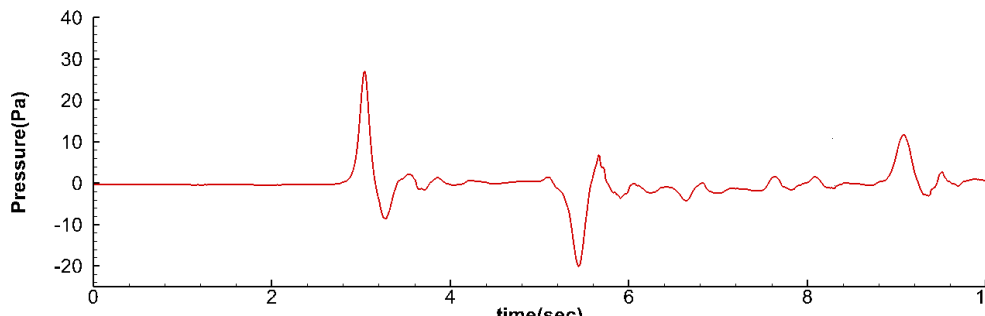
□ Case name : V201-T201-S300

train type	KTX-II	tunnel area	96.7 m ²
compressor type	not adapted	tunnel length	1,000 m
compressor inlet area	N/A	train speed	300 km/h
Pressure contour			
Drag history			
Pressure change			
Micro pressure wave			
Item	Average drag	max(dP/dP _{reg})	Micro-pressure wave
Value	5,591.4 N	50.3 %	34.04 Pa
Reduction rate	N/A	N/A	N/A

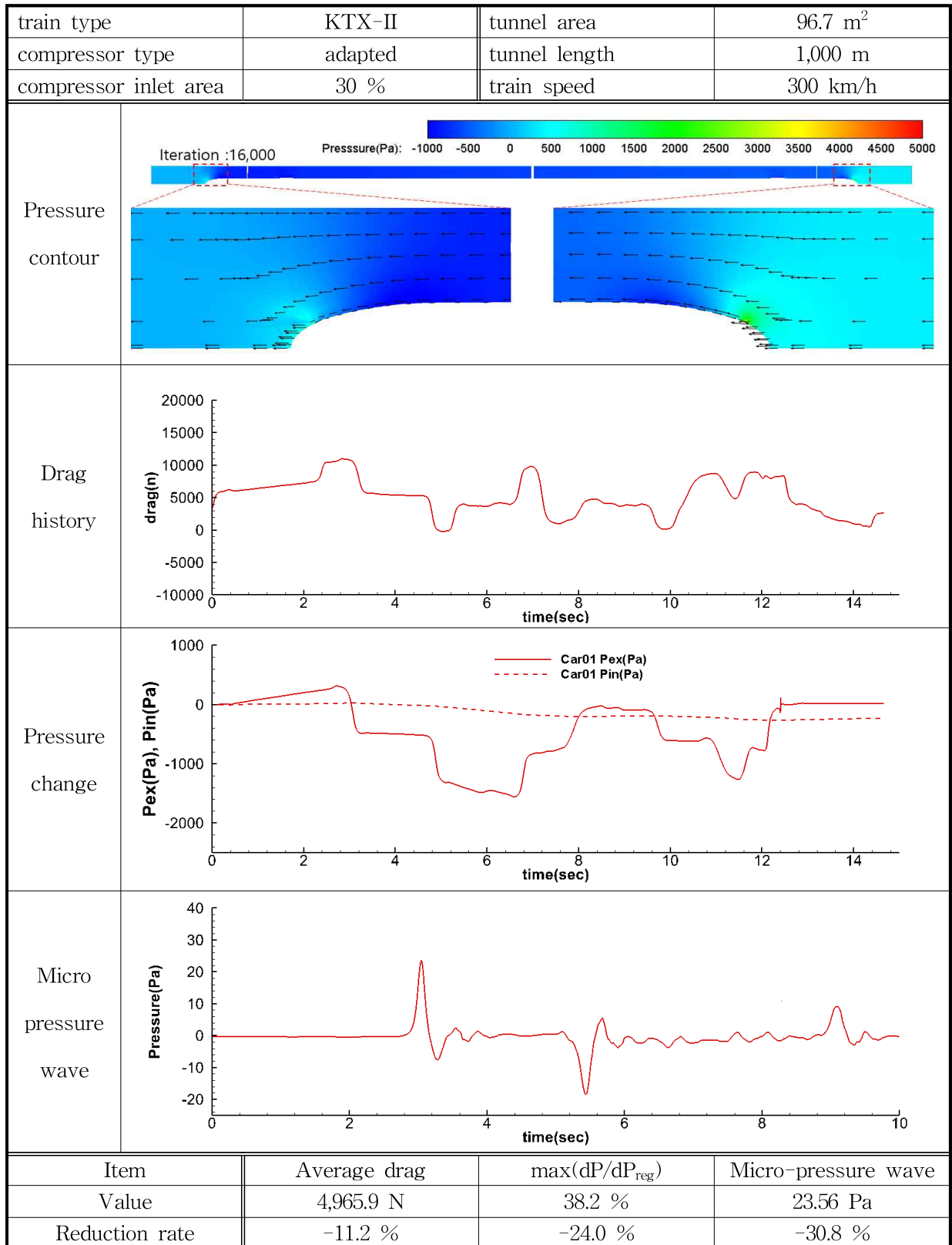
□ Case name : V211-T201-S300



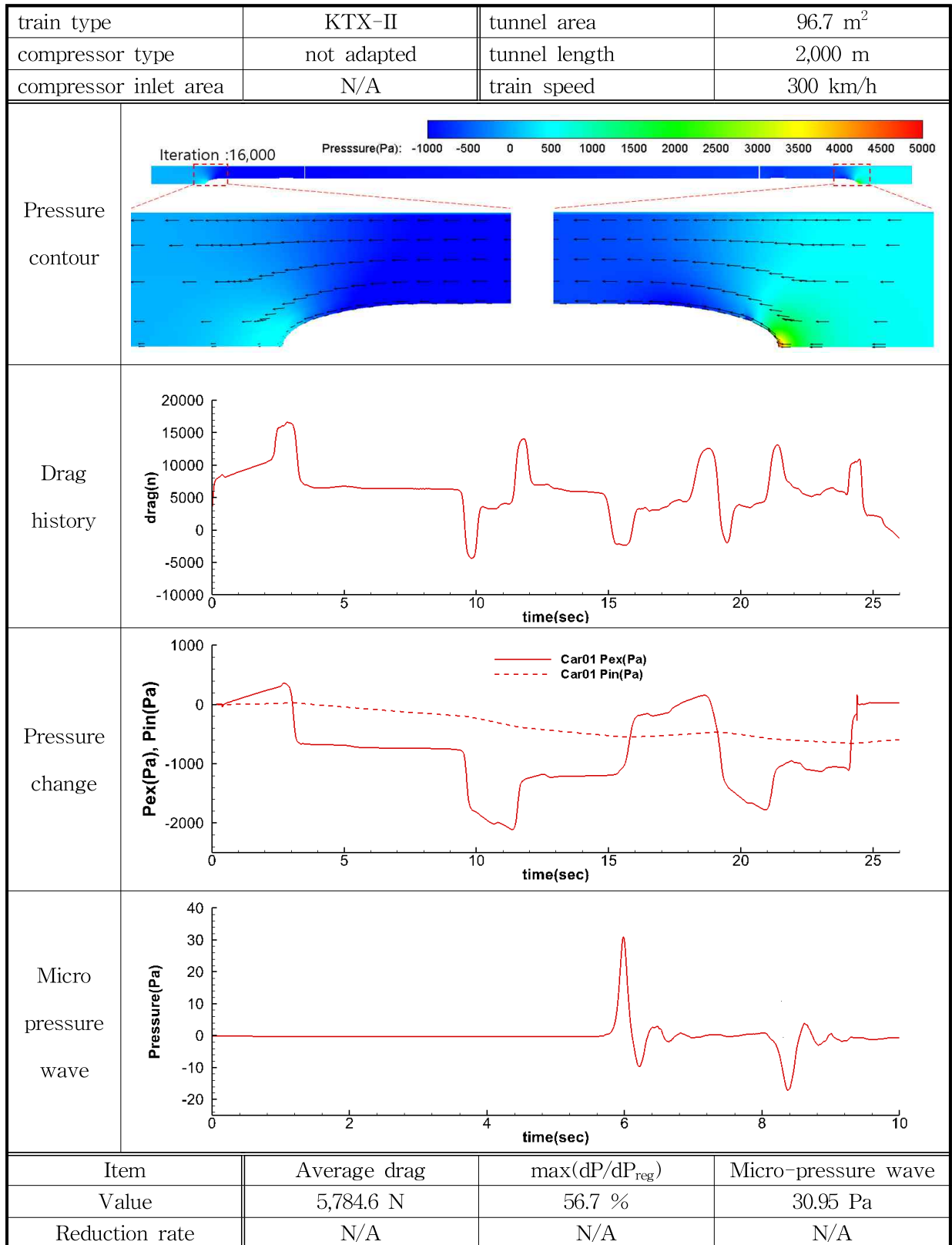
□ Case name : V212-T201-S300

train type	KTX-II	tunnel area	96.7 m ²
compressor type	adapted	tunnel length	1,000 m
compressor inlet area	20 %	train speed	300 km/h
Pressure contour			
Drag history			
Pressure change			
Micro pressure wave			
Item	Average drag	max(dP/dP _{reg})	Micro-pressure wave
Value	5,639.1 N	42.7 %	27.01 Pa
Reduction rate	0.9 %	-15.0 %	-20.7 %

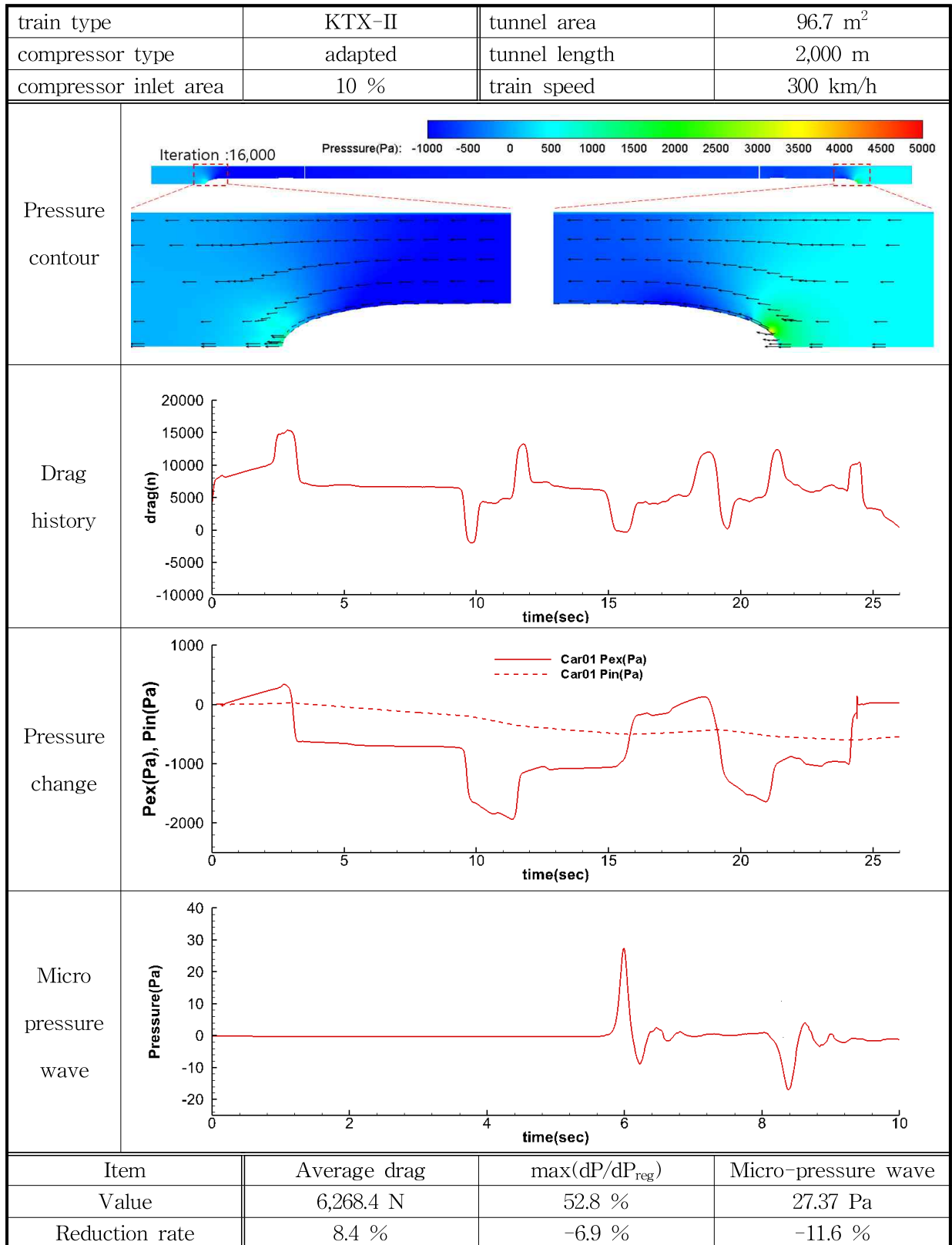
□ Case name : V213-T201-S300



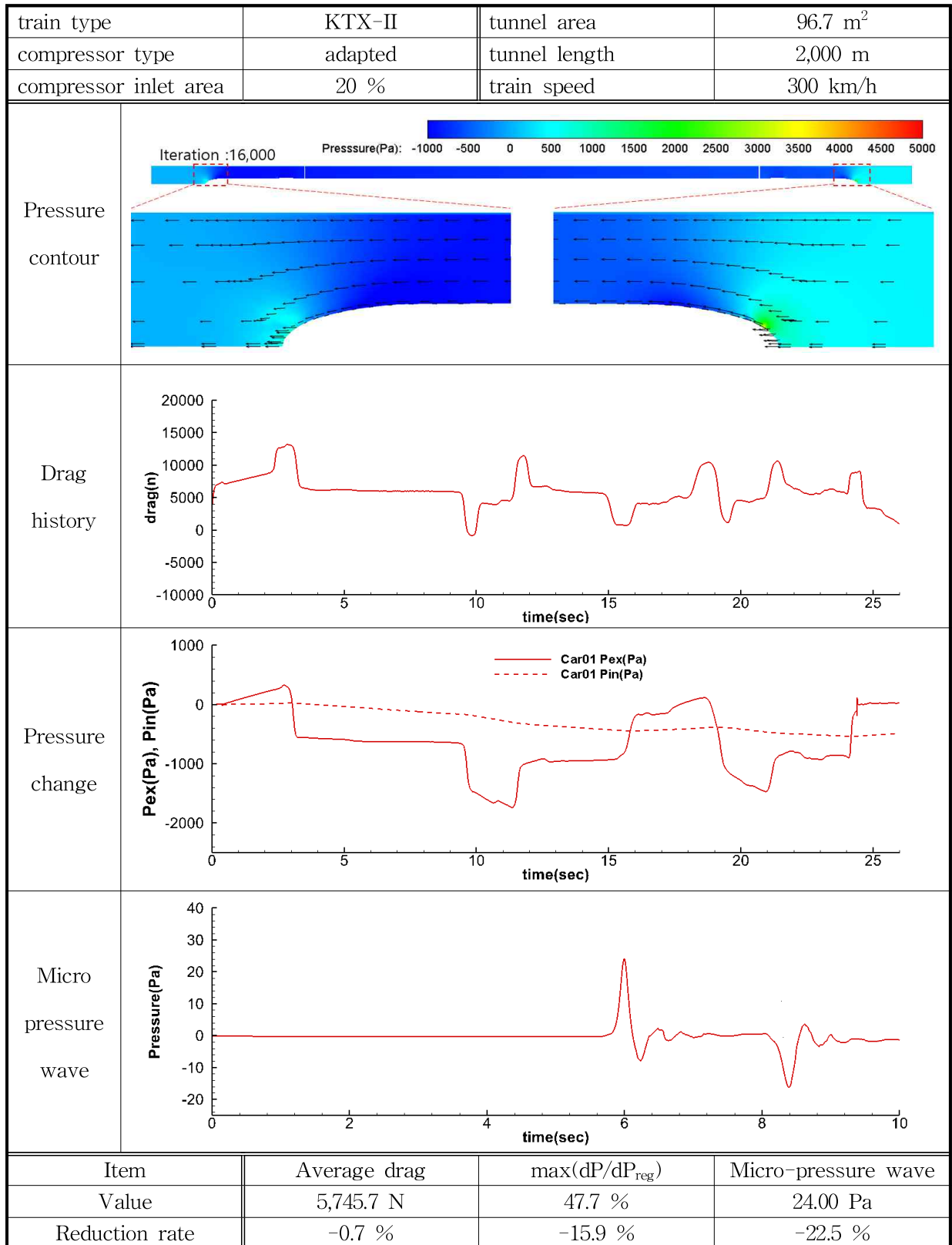
□ Case name : V201-T202-S300



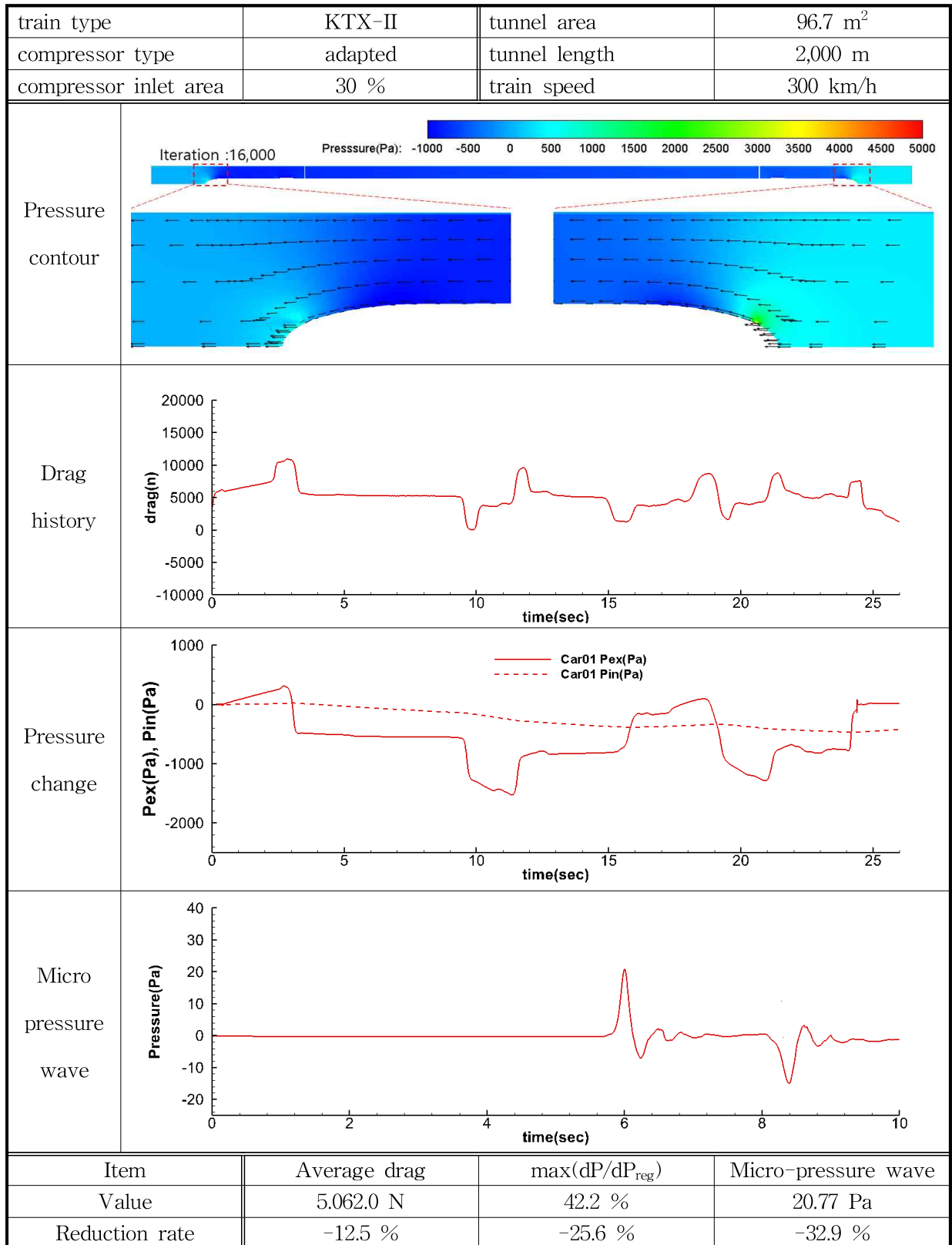
□ Case name : V211-T202-S300



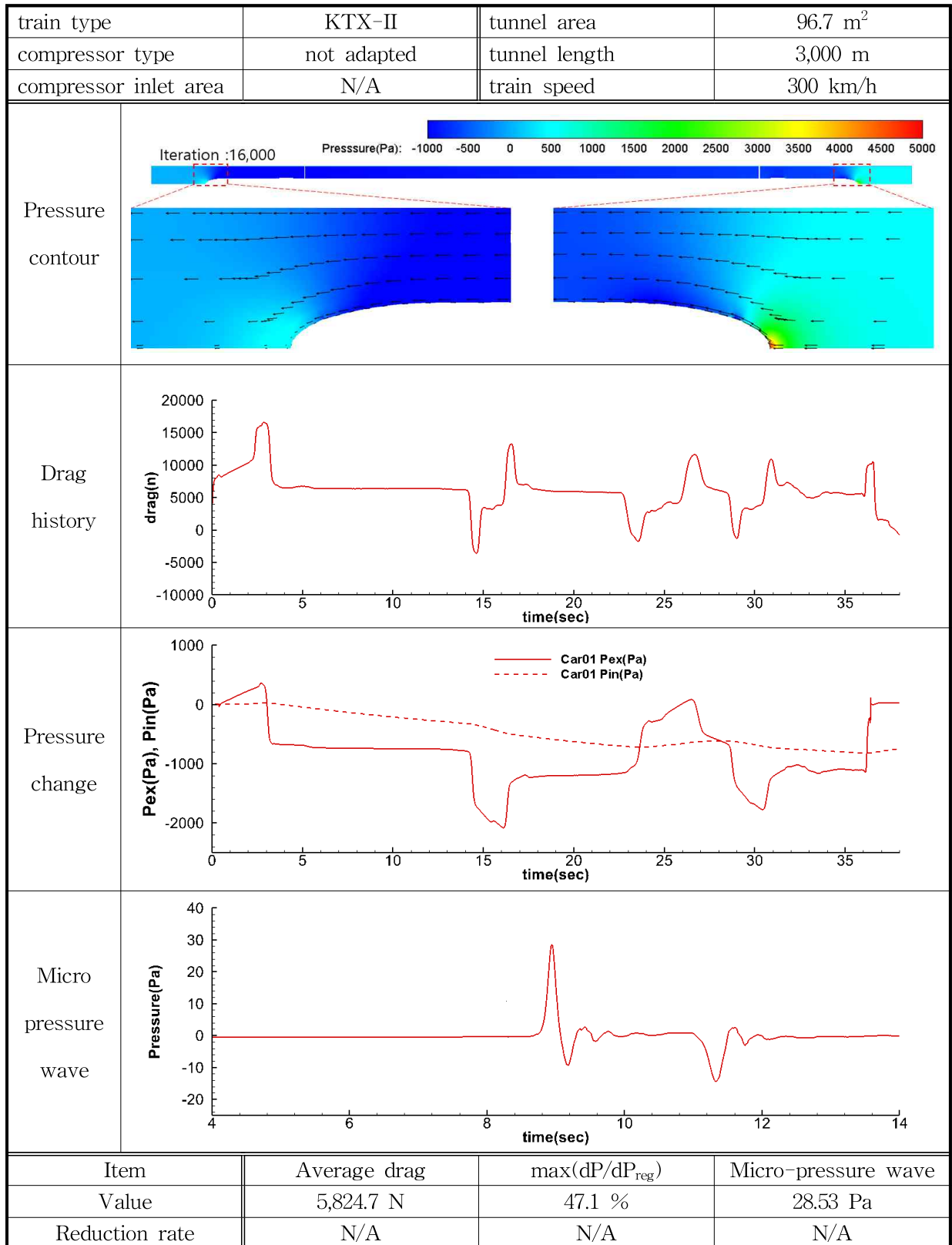
□ Case name : V212-T202-S300



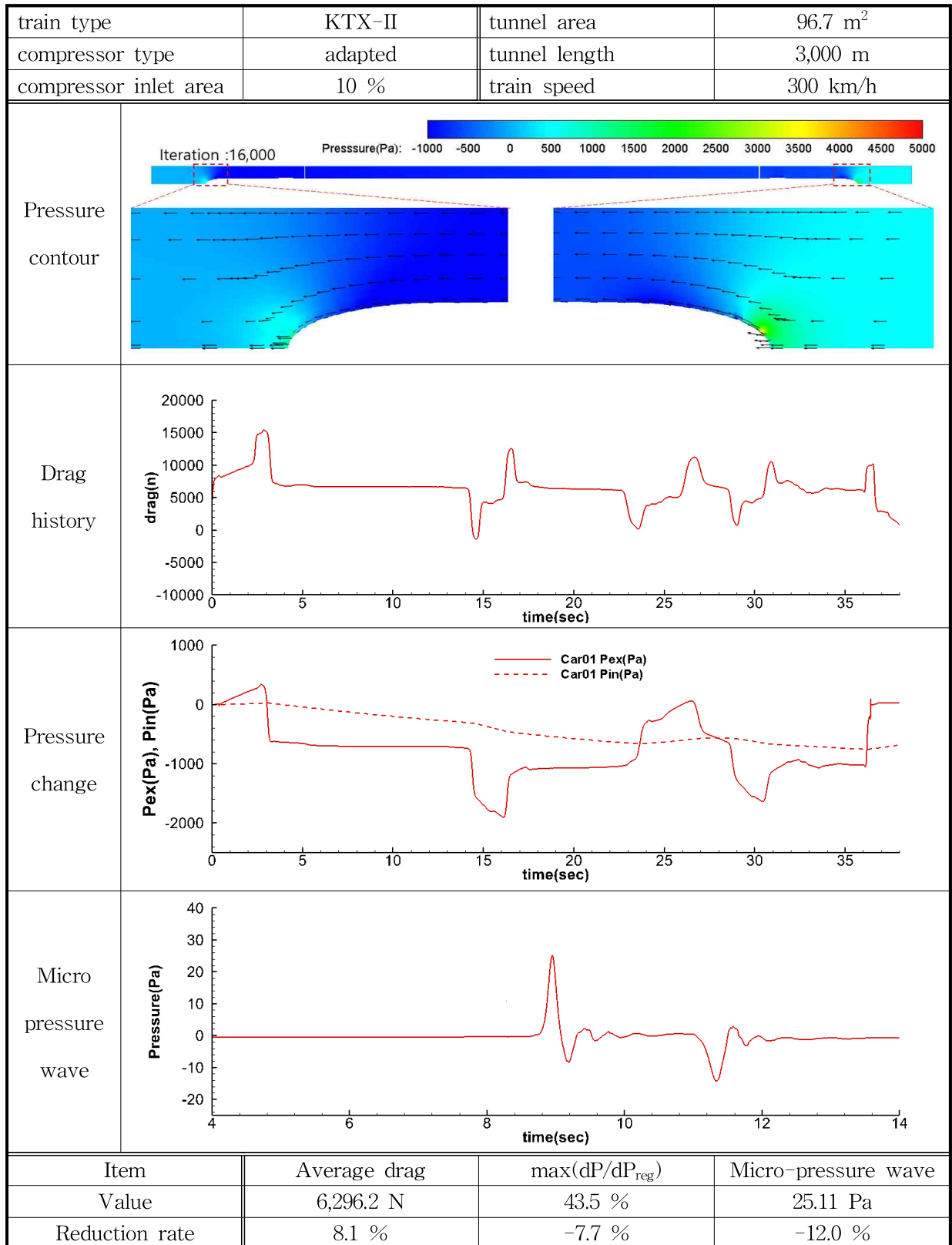
□ Case name : V213-T202-S300



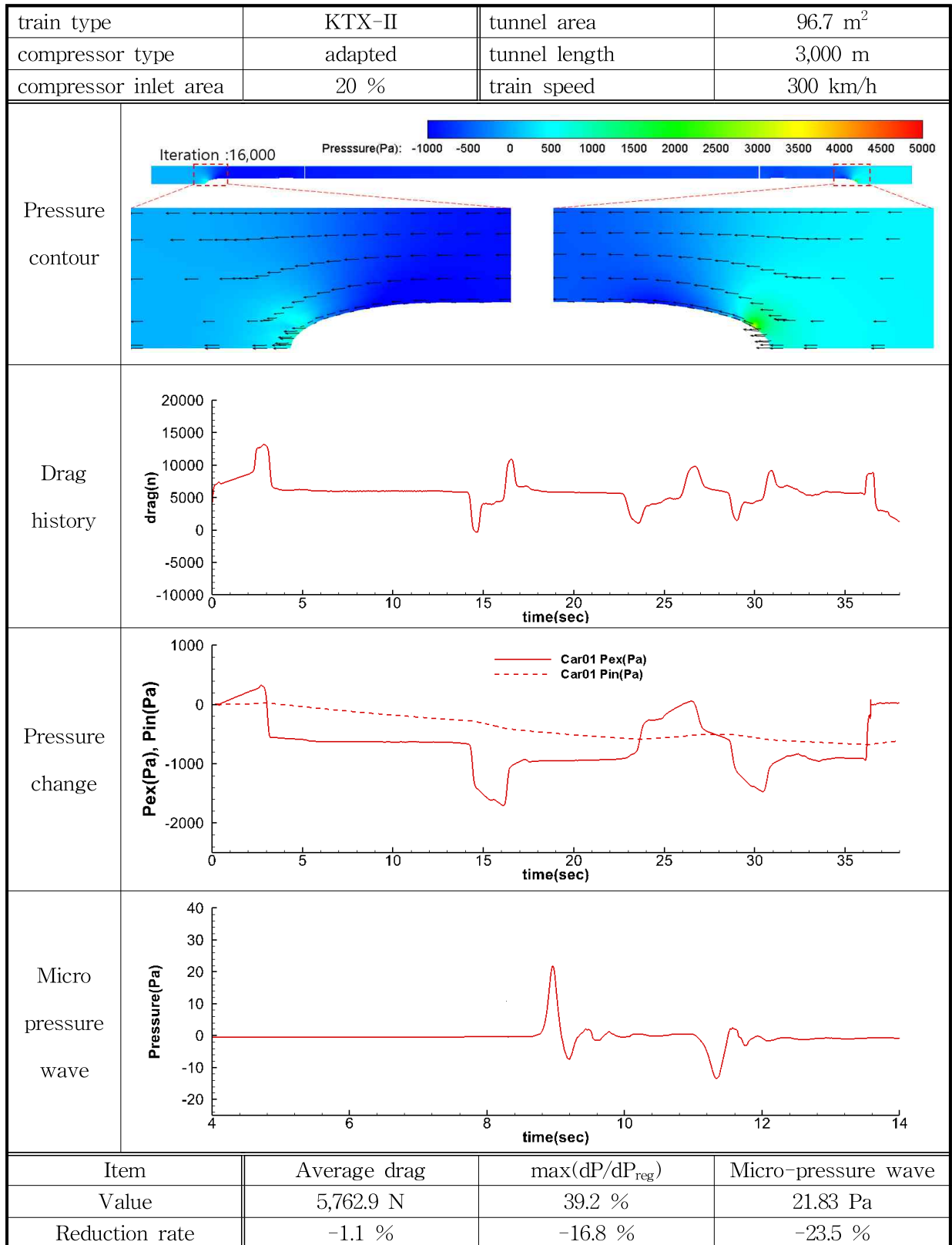
□ Case name : V201-T203-S300



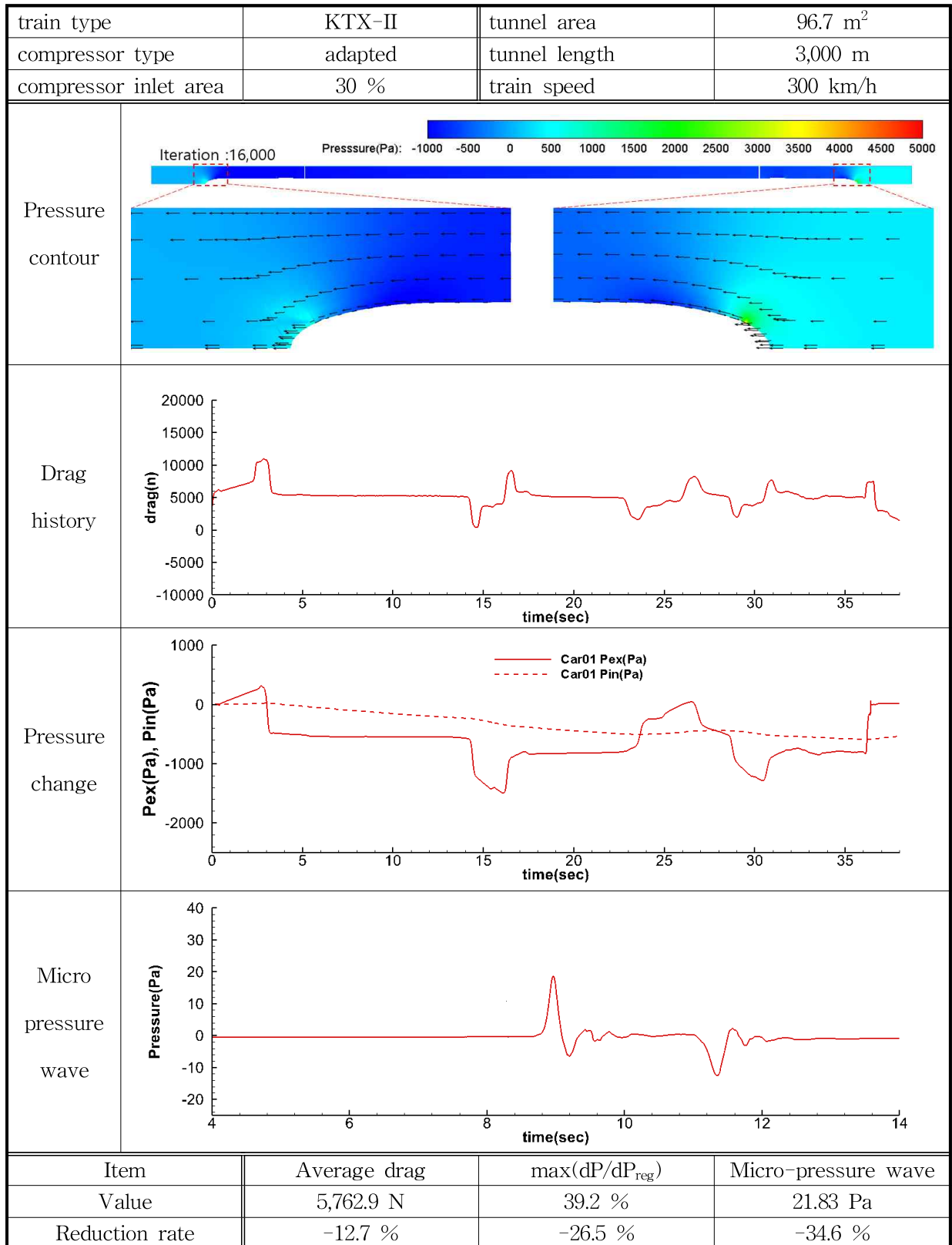
□ Case name : V211-T203-S300



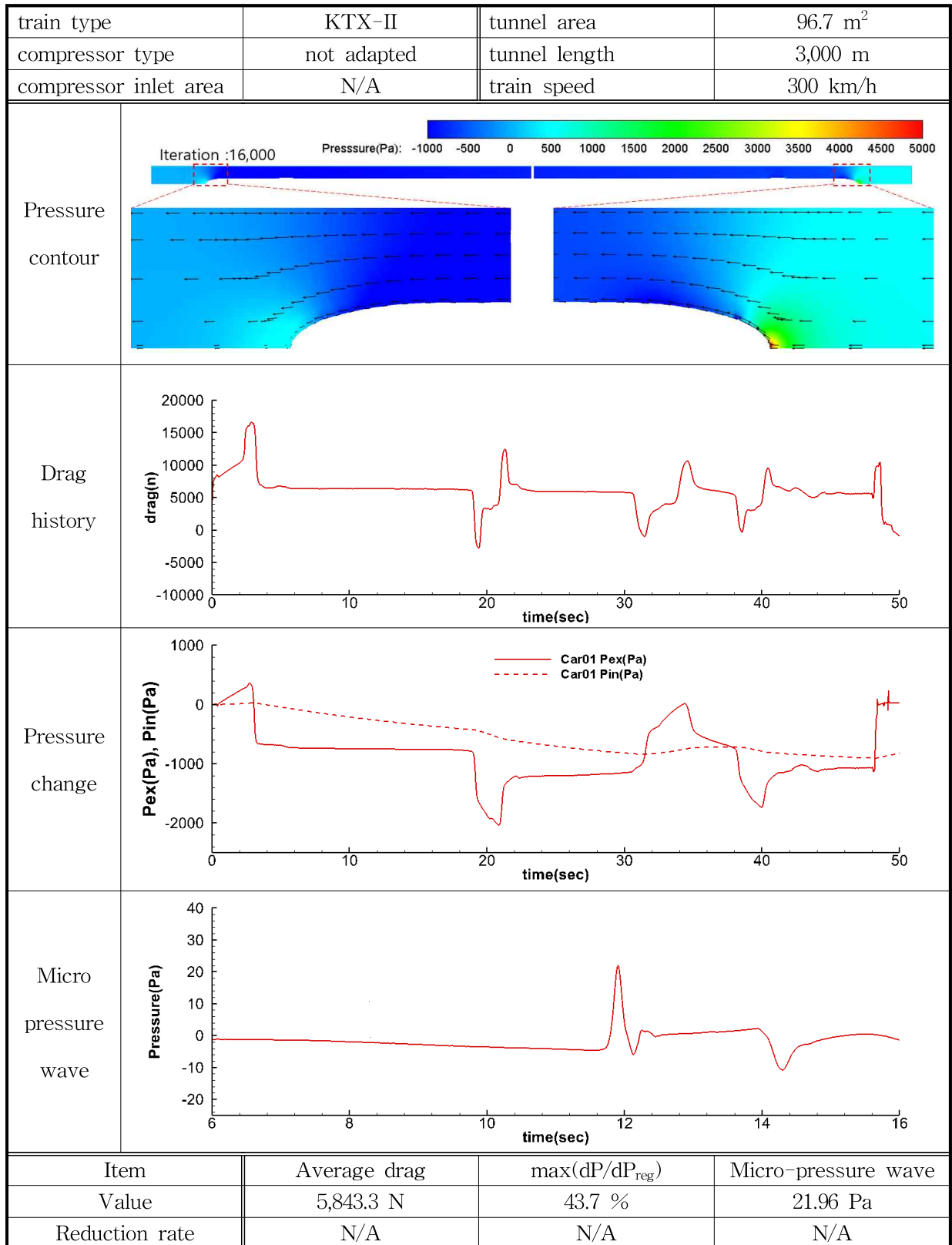
□ Case name : V212-T203-S300



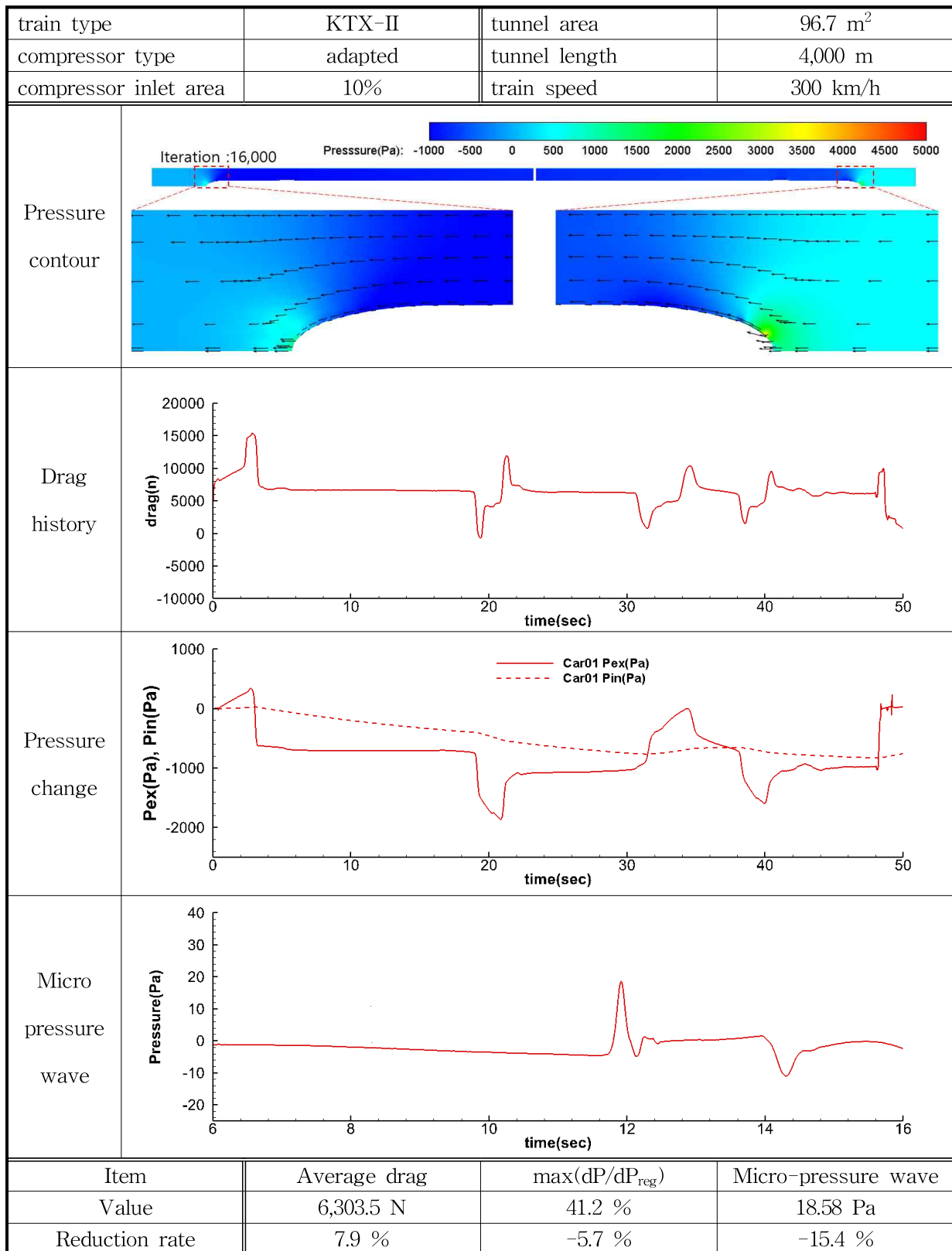
□ Case name : V213-T203-S300



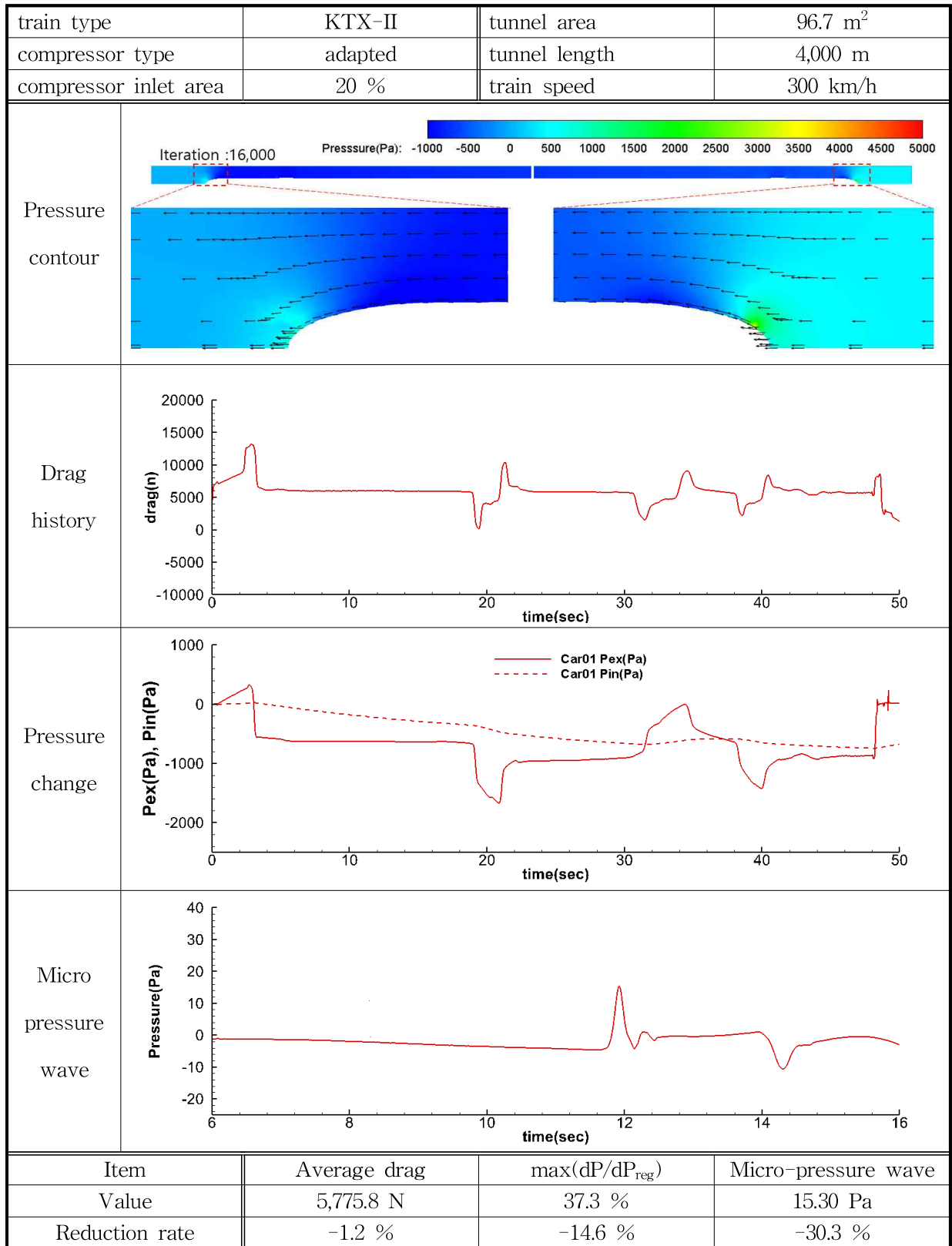
□ Case name : V201-T204-S300



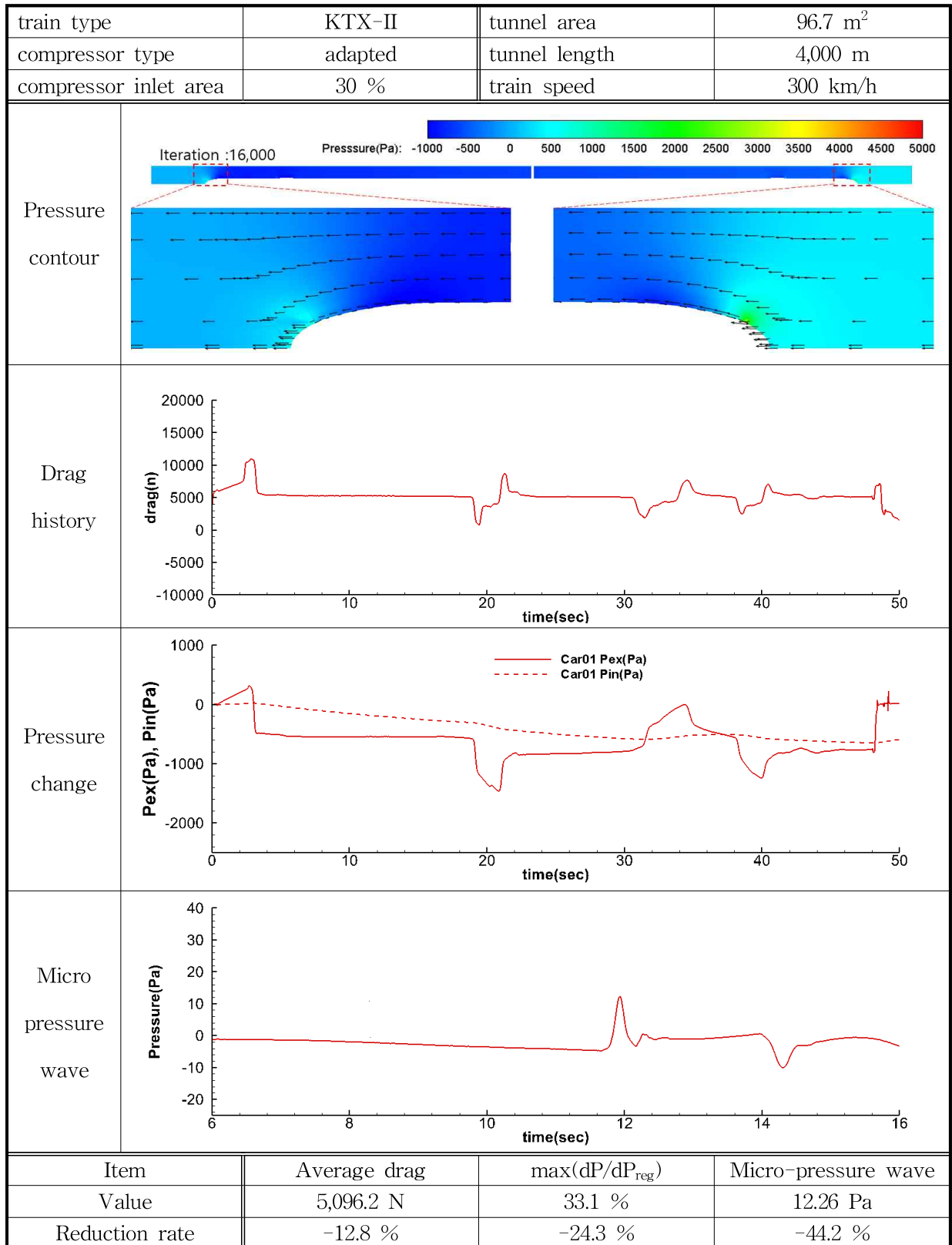
□ Case name : V211-T204-S300



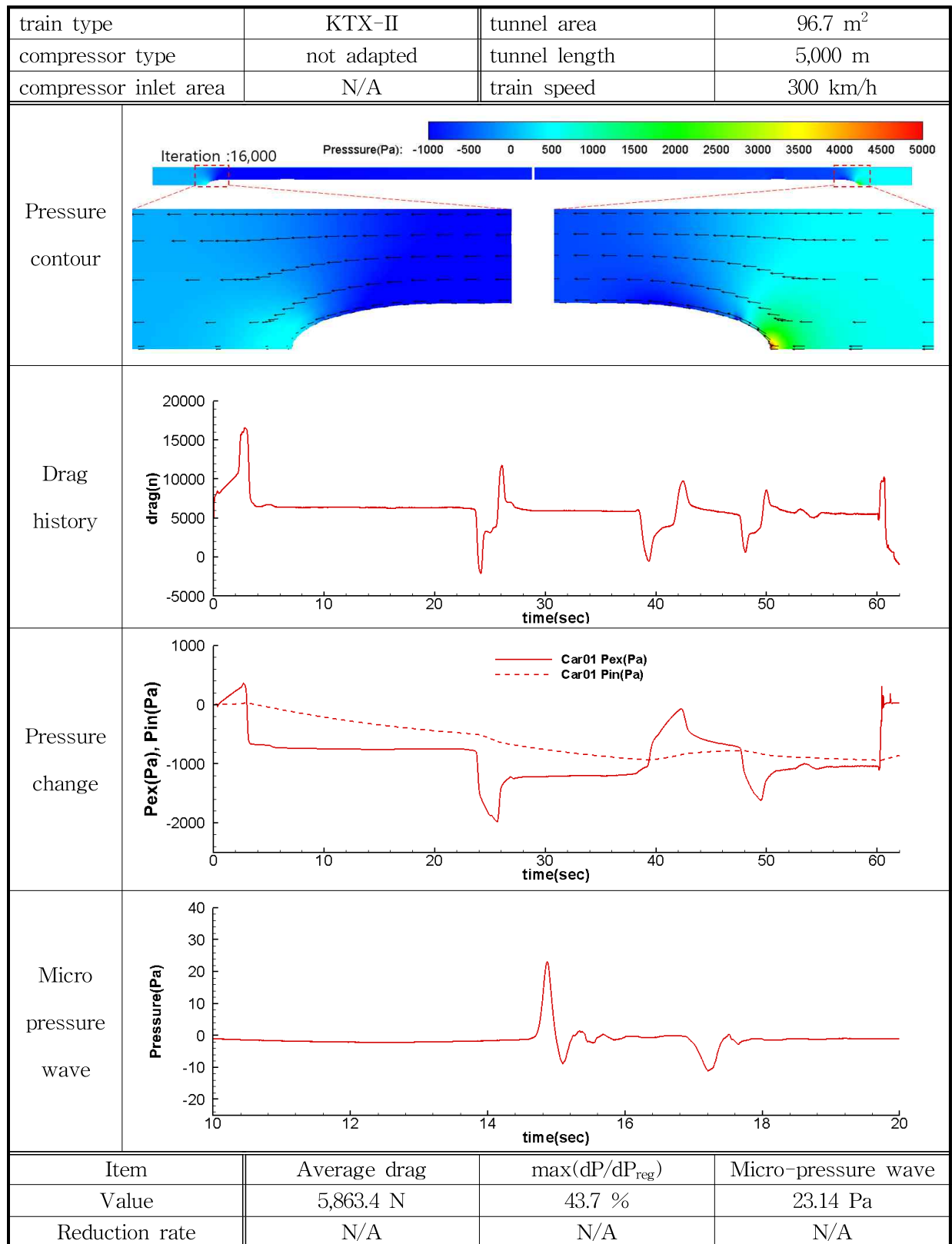
□ Case name : V212-T204-S300



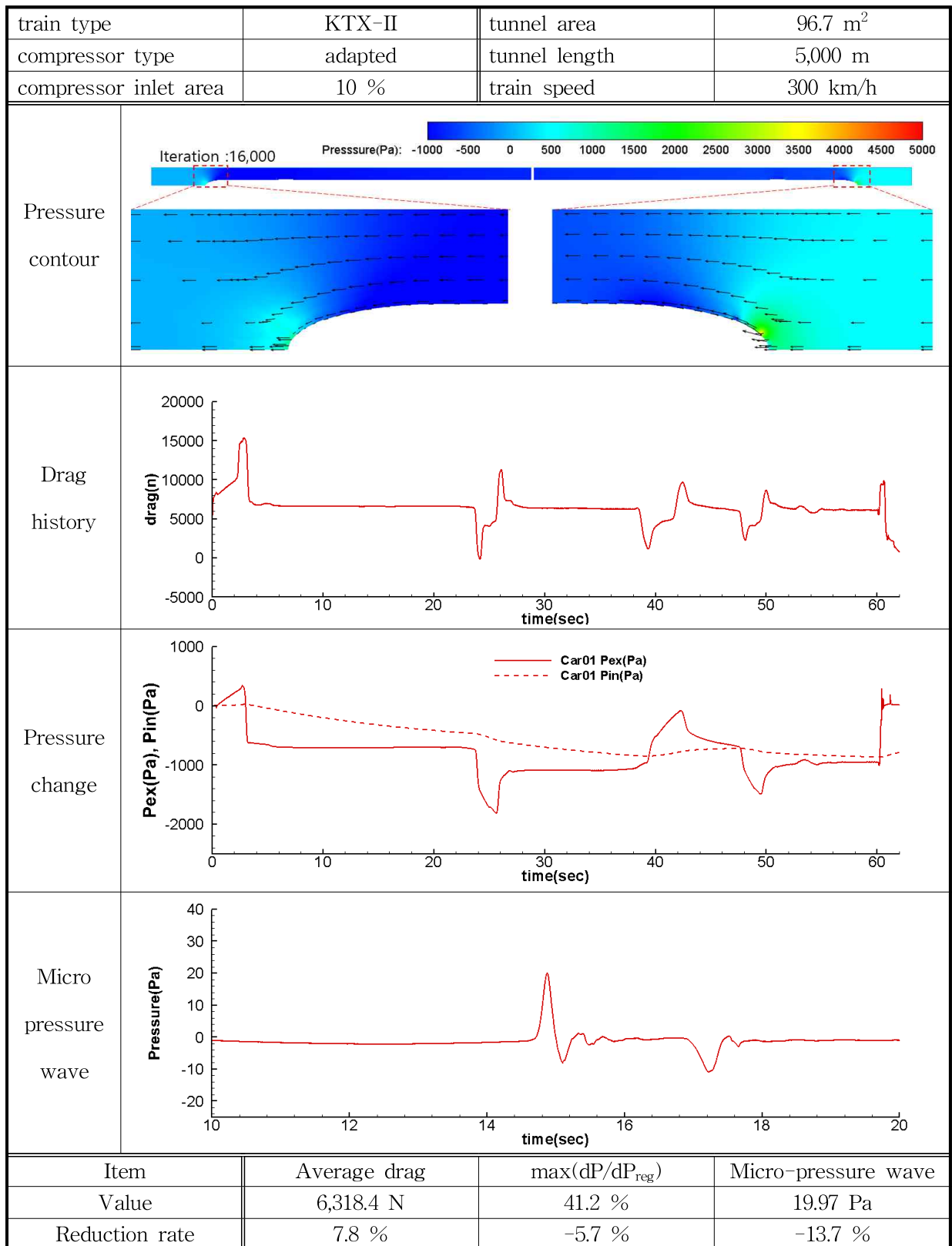
□ Case name : V213-T204-S300



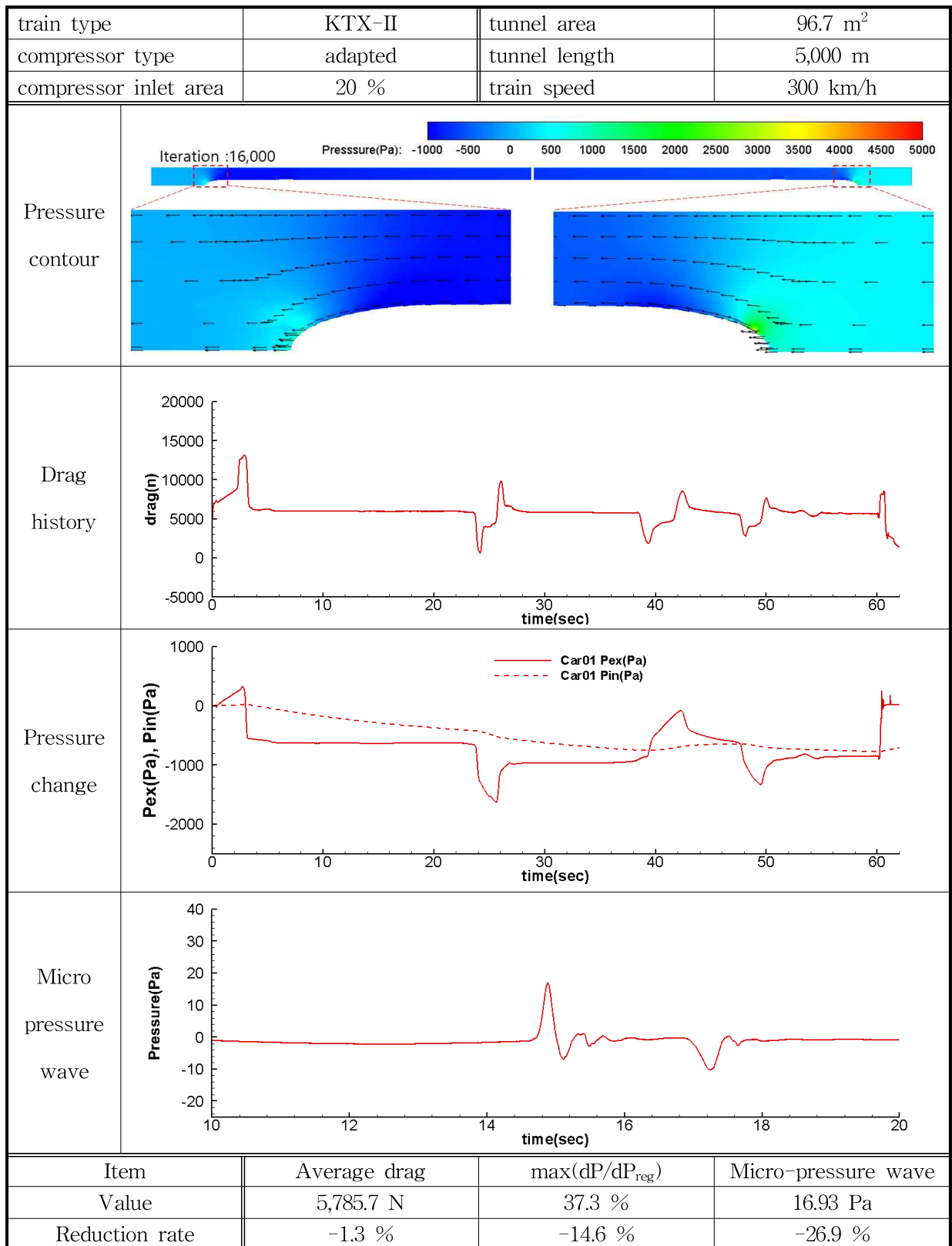
□ Case name : V201-T205-S300



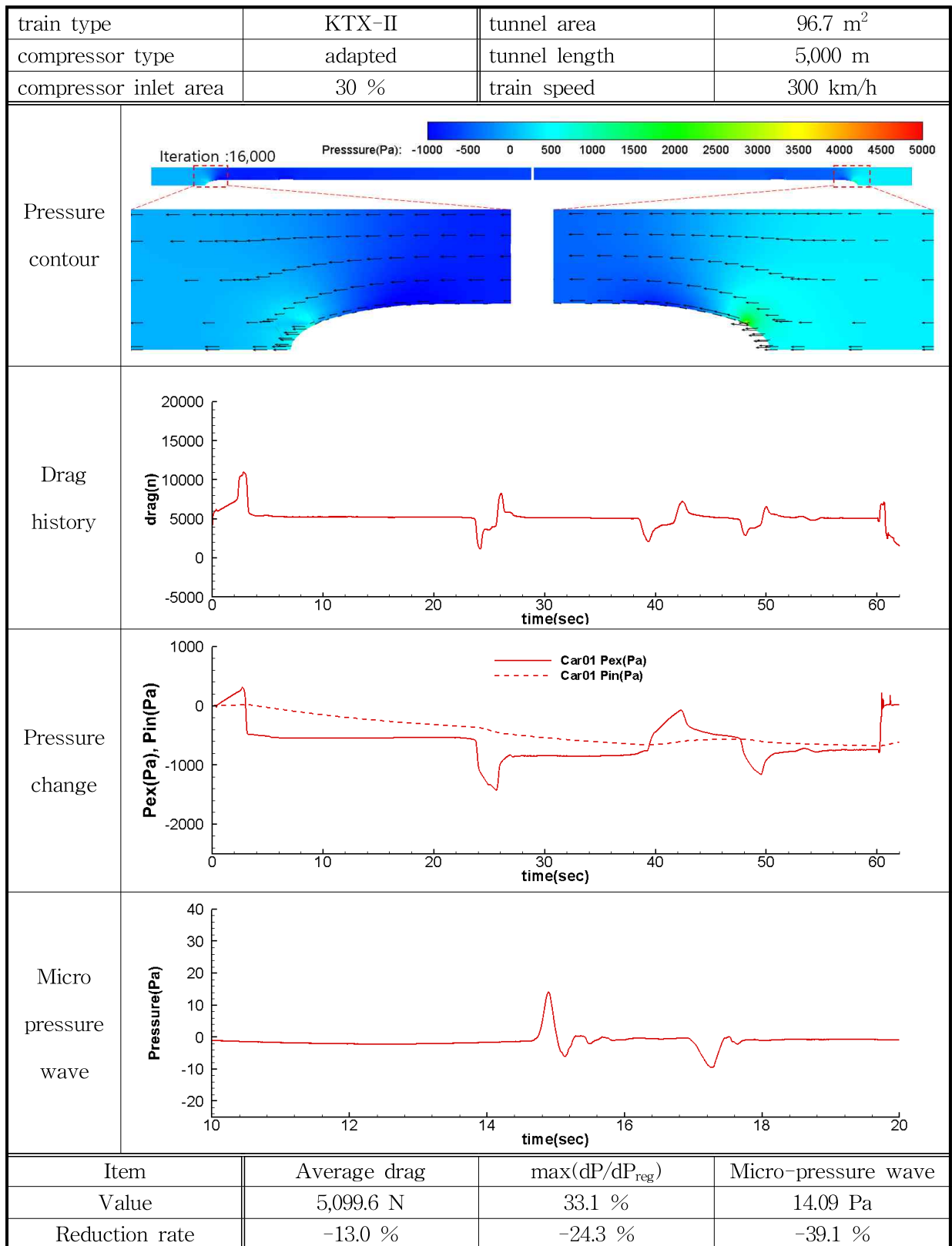
□ Case name : V211-T205-S300



□ Case name : V212-T205-S300



□ Case name : V213-T205-S300





주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.